

Universidad Carlos III de Madrid

Escuela Politécnica Superior

Departamento de Teoría de la Señal y Comunicaciones



**Ing. Técnica de Telecomunicación: Sistemas de
Telecomunicación**

Proyecto Fin de Carrera

*Estudio de las prestaciones en las redes
de sensores a través de la influencia de
la directividad y eficiencia de los
elementos radiantes*

Autor: CARLOS MADROÑO PRADOS

**Tutores: M^a DEL ROCÍO ARROYO VALLES
ÓSCAR QUEVEDO TERUEL**

LEGANÉS, MAYO 2011

Título: ESTUDIO DE LAS PRESTACIONES EN LAS REDES DE SENSORES A TRAVÉS DE LA INFLUENCIA DE LA DIRECTIVIDAD Y EFICIENCIA DE LOS ELEMENTOS RADIANTES

Autor: Carlos Madroño Prados

Tutor: Dra. M^a del Rocío Arroyo Valles
Dr. Óscar Quevedo Teruel

La defensa del presente Proyecto Fin de Carrera se realizó el día 31 de Mayo de 2011; siendo calificada por el siguiente tribunal:

PRESIDENTE: Prof. Dr. Jesús Cid Sueiro
Dpto. TSC, Escuela Politécnica Superior. UC3M.

SECRETARIO: Dr. Eva Rajo Iglesias
Dpto. TSC, Escuela Politécnica Superior. UC3M.

VOCAL: D. Isaac Seoane Pujol
Dpto. Telemática, Escuela Politécnica Superior. UC3M.

Habiendo obtenido la siguiente calificación:

CALIFICACIÓN:

Presidente

Secretario

Vocal

Agradecimientos

Llegado este momento, que siempre me pareció tan lejano, quiero agradecer su ayuda a todas las personas que han contribuido para hacerlo realidad.

En primer lugar a mis tutores Rocío y Oscar a los que estoy realmente agradecido, porque sin vuestra ayuda, tiempo y paciencia no hubiera podido terminar este proyecto. Lamento haber sido tan desastre y haberos causado tantas molestias.

A mis padres, Tomás y Fermina, por su amor, por su apoyo y comprensión, y sobre todo, por todos los sacrificios que han hecho por mí durante tanto tiempo. También a mis hermanos, Enrique e Irene, y a mi abuela Inocencia, gracias por vuestro cariño y ayuda.

A mis Tíos, Piedad, Frutos, Sagrario, Julio y Maricruz, y a mis Primos, gracias por el apoyo e interés que tenéis siempre conmigo.

A mis amigos, *Los chicos del Sansa*, Rafa, Jose, Eli, Llou, Ricky, Vespa, Luso, Omar, Teresa, Maria... a todos, gracias por estar siempre a mi lado, me siento afortunado de estar rodeado de tantas buenas personas. También a mis compañeros de clase, Miguel, Bea, Antonio, Carlos, Gloria, Alex, María, Santi... por vuestra ayuda y los buenos ratos que hemos pasado este tiempo.

Por último, y de manera muy especial, a mi Tío Mariano y mis Abuelos Medardo, Dorotea y Feliciano, porque a pesar de que la vida no ha permitido que disfrutaran este momento conmigo, siempre les tengo en mi recuerdo.

Resumen

En el presente Proyecto Fin de Carrera se estudia y analiza la influencia de los parámetros radiantes de los sensores sobre las prestaciones de redes formadas por un gran número de estos dispositivos. Parámetros de radiación como la eficiencia y directividad de la antena transmisora y receptora, tipo de antena o el diagrama de radiación son analizados en este proyecto. En particular, estos parámetros se introducen a través de un modelo de distancias equivalentes que se utiliza para determinar los posibles enlaces de comunicación entre nodos.

Para ello se emplean redes de sensores homogéneas desplegadas de forma aleatoria en la región de interés. La comunicación entre los nodos se efectúa mediante un sencillo algoritmo de enrutamiento, *Greedy Forwarding*. Además, en este Proyecto Fin de Carrera se han considerado como variables de diseño la densidad de la red y el radio de cobertura de los nodos sensores con el fin de poder establecer algunas guías de diseño de las redes.

Para la evaluación y análisis de las prestaciones de red, medidas como el número de mensajes recibidos en el nodo destino, se han considerado tres escenarios diferentes. En el primero las antenas son ideales (es decir, omnidireccionales). En el segundo, las antenas de los sensores son dipolos de diferente longitud, modelados tanto en 2 como en 3 dimensiones. Finalmente, se han considerado patrones de radiación correspondientes a dos antenas reales.

PALABRAS CLAVE: redes de sensores, directividad, eficiencia, diagramas de radiación, tipos de antena.

Abstract

This Bachelor Thesis examines and analyzes the influence of radiant parameters of sensors on the performance of wireless networks made up by a large number of these devices. Radiation parameters such as efficiency and directivity of the transmitting and receiving antenna, or the type of radiation pattern are analyzed in this Bachelor Thesis. In particular, these parameters have been included through a model based on equivalent distances, which is used to define communication links between nodes.

To this aim, a homogeneous sensor network has been randomly deployed in the region of interest. Communication between nodes is established via a simple routing algorithm known as Greedy Forwarding. Additionally, other design variables such as network density and the sensor coverage radius are also taken into account in this Thesis in order to establish some guidelines for network design.

Network performance has been assessed through the number of messages received at the destination node for three different scenarios. Initially, antennas are ideal (i.e., they present omnidirectional radiation patterns). In the second scenario, sensor antennas are dipoles of different lengths, shaped in both 2D and 3D configurations. Finally, we have considered the radiation patterns corresponding to two real antennas extracted from the literature.

KEYWORDS: Sensor networks, directivity, radiation efficiency, radiation patterns, types of antenna.

Índice general

Capítulo 1

<i>Introducción y objetivos.....</i>	<i>1</i>
--------------------------------------	----------

Capítulo 2

<i>Estado del Arte</i>	<i>5</i>
2.1. Redes de sensores inalámbricas.....	5
2.1.1. Introducción.....	5
2.1.2. Características de las redes de sensores.....	6
2.1.3. Aplicaciones de las redes de sensores inalámbricas.....	11
2.2. Antenas	13
2.2.1. Introducción.....	13
2.2.2. Parámetros fundamentales de antenas	14
2.2.3. Antenas en sensores inalámbricos	17
2.3. Motivación de este Proyecto Fin de Carrera.....	18

Capítulo 3

<i>Entorno de trabajo y escenarios</i>	<i>21</i>
3.1. Entorno de trabajo	21
3.2. Incorporación de las características radiantes de las antenas.....	23
3.3. Algoritmo de enrutamiento: <i>Greedy Forwarding</i>.....	26
3.4. Escenarios.....	28
a. Primer escenario: antenas ideales	28
b. Segundo escenario: antenas dipolo.....	29
Entorno de trabajo 2 dimensiones	31
Entorno de trabajo 3 dimensiones	36
c. Tercer escenario: antenas reales	41

Capítulo 4

Resultados 45

- 4.1. Resultados de las simulaciones 45**
 - a. Primer escenario: antenas ideales 45
 - b. Segundo escenario: antenas dipolo 54
 - Entorno de trabajo 2 dimensiones 55
 - Entorno de trabajo 3 dimensiones 68
 - c. Tercer escenario: antenas reales 77

Capítulo 5

Conclusiones y líneas futuras 79

- 5.1. Conclusiones 79**
- 5.2. Líneas futuras de investigación 81**

Apéndice

Planificación y presupuesto 83

- 1. Descomposición en tareas 83**
- 2. Recursos 86**
- 3. Presupuesto del proyecto 87**

Referencias 89

Lista de figuras

Figura 1.- Esquema del despliegue de una red inalámbrica de sensores, WSN, y conexión con otras redes y con el usuario a través del sink.	6
Figura 2.- Arquitectura de un nodo sensor.....	7
Figura 3.- Equipos de motas reales	7
Figura 4.- Topologías típicas de las redes de sensores.	10
Figura 5.- Equivalente de Thevenin de una antena en modo transmisión.	13
Figura 6.- Campo de sensores de $700 \times 700 \text{ m}^2$, (a) con 70 nodos-sensores, (b) con 130 nodos-sensores.	22
Figura 7.- Topología de red de sensores con antenas omnidireccionales (ideales), donde la eficiencia de las antenas en transmisión y recepción es del (a) 10%, (b) 50%, (c) 80% y (d) 100%. Red de 10 nodos en un campo de sensores de $300 \times 300 \text{ m}^2$	24
Figura 8.- Topología de red de sensores con antenas tipo dipolo, para diferentes longitudes: (a) 0.2λ , (b) 0.4λ , (c) 0.8λ y (d) λ . Las antenas tienen eficiencia del 100%. Red de 10 nodos en un campo de sensores de $300 \times 300 \text{ m}^2$	25
Figura 9.- Ejemplo de funcionamiento del algoritmo Greedy Forwarding. El nodo y es el de mayor avance hacia el destino, el nodo D, de los vecinos de x.	27
Figura 10.- Ejemplo en el que el Greedy Forwarding falla. El nodo x es un máximo local en las proximidades de D.	27
Figura 11.- Diagrama de radiación de una antena isotrópica (ideal), situada en el origen de coordenadas.	28
Figura 12.- (a) Diagrama de radiación de una antena ideal situada en el origen de coordenadas con corte en el plano xy (plano $z=0$) (b) Representación del diagrama de radiación en el plano xy.	29
Figura 13.- Diagrama de radiación de un dipolo de longitud λ situado en el origen de coordenadas. El dipolo está colocado en la dirección del eje z.	30
Figura 14.- Diagrama de radiación de una antena dipolo para distintas longitudes de dipolo.	30
Figura 15.- (a) Representación en tres dimensiones del diagrama de radiación de un dipolo de longitud λ y el plano de referencia (en verde, plano xz), y (b) diagrama de radiación del dipolo en el plano xz.	31
Figura 16.- Campo de sensores de $12 \times 8 \text{ m}^2$ con dos dipolos de longitud λ	32
Figura 17.- (a) El dipolo 1 tiene una orientación de 332° , (b) el dipolo 2 está orientado a 268°	32
Figura 18.- (a) El dipolo 1 ve al dipolo 2 a 173° , (b) el dipolo 2 ve al dipolo 1 a 353°	33
Figura 19.- Pseudocódigo utilizado para calcular el ángulo α	34
Figura 20.- Pseudocódigo utilizado para calcular el ángulo θ'	35
Figura 21.- (a) El dipolo 1 ve al nodo 2 a 201° , (b) el dipolo 2 ve al nodo 1 a 85°	35

Figura 22.- Diagrama de radiación de un dipolo de longitud λ . Valores de los parámetros $\theta = 201^\circ$ y $\theta = 85^\circ$, con los respectivos valores de directividad de 0.002 y 2.359 en u.n.	36
Figura 23.- Dipolo en el origen de coordenadas orientado en el eje z ($\theta=0^\circ$).	37
Figura 24.- (a) Dipolo situado en el origen de coordenadas y orientado en $\theta=150^\circ$ y $\Phi=45^\circ$. (b) Dipolo situado en el origen de coordenadas y orientado en el eje x ($\theta=90^\circ$ y $\Phi=0^\circ$).	37
Figura 25.- Dipolo en el espacio de tres dimensiones, orientado según θ' y Φ'	38
Figura 26.- Campo de sensores de $12 \times 12 \text{ m}^2$ con dos dipolos orientados en el espacio.	39
Figura 27.- (a) El dipolo 1 ve al nodo 2 a 110° . (b) Representación del diagrama de radiación del dipolo 1 en función de ϕ_d . En $\phi_d = 110^\circ$ el valor de directividad es 2.419 u.n.	40
Figura 28.- (a) El dipolo 2 ve al nodo 1 a 290° . (b) Representación del diagrama de radiación del dipolo 2 en función de ϕ_d . En $\phi_d = 290^\circ$ el valor de directividad es 2.419 u.n.	41
Figura 29.- (a) Diagrama de radiación de la antena definida en (b) Diagrama de radiación de la antena definida en [21].	42
Figura 30.- Número de mensajes recibidos en el sink cuando varía la eficiencia de las antenas en una red con (a) 70 nodos, (b) 85 nodos. El radio de cobertura de los sensores es 150 m.	46
Figura 31.- Número de mensajes recibidos en el sink cuando varía la eficiencia de las antenas en una red con (a) 100 nodos, (b) 115 nodos, y (c) 130 nodos. El radio de cobertura de los sensores es 150 m.	47
Figura 32.- Comparativa para distintas densidades de red del número de mensajes recibidos en el nodo destino cuando varía la eficiencia de las antenas (ideales). El radio de cobertura de los sensores es 150 m.	48
Figura 33.- Número de mensajes recibidos en el sink cuando varía la eficiencia de las antenas en una red con 130 nodos. El radio de cobertura de los sensores es 250 m.	48
Figura 34.- Número de mensajes recibidos en el sink cuando varía la eficiencia de las antenas en una red con (a) 70 nodos, (b) 85 nodos, (c) 100 nodos, y (d) 115 nodos. El radio de cobertura de los sensores es 250 m.	49
Figura 35.- Comparativa para distintas densidades de red del número de mensajes recibidos en el nodo destino cuando varía la eficiencia de las antenas (ideales). El radio de cobertura de los sensores es 250 m.	50
Figura 36.- Número de mensajes recibidos en el sink cuando varía la eficiencia de las antenas en una red con (a) 115 nodos, (b) 130 nodos. El radio de cobertura de los sensores es 300 m.	50
Figura 37.- Número de mensajes recibidos en el sink cuando varía la eficiencia de las antenas en una red con (a) 70 nodos, (b) 85 nodos, y (c) 100 nodos. El radio de cobertura de los sensores es 300 m.	51
Figura 38.- Comparativa para distintas densidades de red del número de mensajes recibidos en el nodo destino cuando varía la eficiencia de las antenas (ideales). El radio de cobertura de los sensores es 300 m.	52
Figura 39.- Comparativa del número de mensajes recibidos en el nodo destino cuando varía la eficiencia de las antenas (ideales) y para distintos radios de cobertura de los nodos. Redes con 100 nodos.	53
Figura 40.- Comparativa del número de mensajes recibidos en el nodo destino cuando varía la eficiencia de las antenas (ideales) y para distintos radios de	

cobertura de los nodos en redes con (a) 70 nodos, (b) 85 nodos, (c) 115 nodos, y (d) 130 nodos.	54
Figura 41.- Número de mensajes recibidos en el nodo destino cuando varía la eficiencia de las antenas para distintas longitudes de dipolo en una red de 100 nodos. También se incluyen resultados para la red con antenas ideales. El radio de cobertura de los sensores es 150 m.	55
Figura 42.- Zoom de la Figura 40 cuando la eficiencia de las antenas transmisora y receptora es elevada.	56
Figura 43.- Número de mensajes recibidos en el nodo destino cuando varía la eficiencia de las antenas para distintas longitudes de dipolo en una red de 100 nodos. También se incluyen resultados para la red con antenas ideales. El radio de cobertura de los sensores es 250 m.	57
Figura 44.- En trazo discontinuo y color verde, enlaces establecidos en una red de 20 nodos con antenas ideales y eficiencia del 35 %. En trazo continuo y color azul, enlaces establecidos en una red de 20 nodos con antenas dipolo de longitud 0.2λ y eficiencia del 35 %.	58
Figura 45.- En trazo discontinuo y color verde, enlaces establecidos en una red de 20 nodos con antenas ideales y eficiencia del 100 %. En trazo continuo y color azul, enlaces establecidos en una red de 20 nodos con antenas dipolo de longitud 0.2λ y eficiencia del 100 %.	58
Figura 46.- Número de mensajes recibidos en el nodo destino cuando varía la eficiencia de las antenas para distintas longitudes de dipolo en una red de 100 nodos. También se incluyen resultados para la red con antenas ideales. El radio de cobertura de los sensores es 300 m.	59
Figura 47.- Número de mensajes recibidos en el nodo destino cuando varía la eficiencia de las antenas y el radio de cobertura de los sensores para una red de 100 nodos y longitud del dipolo igual a λ	60
Figura 48.- Número de mensajes recibidos en el nodo destino cuando varía la eficiencia de las antenas y el radio de cobertura de los sensores para una red de 100 nodos y longitud del dipolo igual a (a) 0.2λ , (b) 0.4λ , (c) 0.6λ , y (d) 0.8λ	61
Figura 49.- Número de mensajes recibidos en el nodo destino cuando varía la eficiencia de las antenas para distintas longitudes de dipolo en una red de 70 nodos. También se incluyen resultados para la red con antenas ideales. El radio de cobertura de los sensores es 250 m.	62
Figura 50.- Número de mensajes recibidos en el nodo destino cuando varía la eficiencia de las antenas para distintas longitudes de dipolo en una red de 85 nodos. También se incluyen resultados para la red con antenas ideales. El radio de cobertura de los sensores es 250 m.	62
Figura 51.- Número de mensajes recibidos en el nodo destino cuando varía la eficiencia de las antenas para distintas longitudes de dipolo en una red de 115 nodos. También se incluyen resultados para la red con antenas ideales. El radio de cobertura de los sensores es 250 m.	63
Figura 52.- Número de mensajes recibidos en el nodo destino cuando varía la eficiencia de las antenas para distintas longitudes de dipolo en una red de 130 nodos. También se incluyen resultados para la red con antenas ideales. El radio de cobertura de los sensores es 250 m.	63
Figura 53.- Número de mensajes recibidos en el nodo destino cuando varía la eficiencia de las antenas y la densidad de red para longitud del dipolo de 0.2λ . El radio de cobertura de los sensores es 250 m.	64

Figura 54.- Número de mensajes recibidos en el nodo destino cuando varía la eficiencia de las antenas y la densidad de red para longitud del dipolo de 0.4λ . El radio de cobertura de los sensores es 250 m.	65
Figura 55.- Número de mensajes recibidos en el nodo destino cuando varía la eficiencia de las antenas y la densidad de red para longitud del dipolo de 0.6λ . El radio de cobertura de los sensores es 250 m.	65
Figura 56.- Número de mensajes recibidos en el nodo destino cuando varía la eficiencia de las antenas y la densidad de red para longitud del dipolo de 0.8λ . El radio de cobertura de los sensores es 250 m.	66
Figura 57.- Número de mensajes recibidos en el nodo destino cuando varía la eficiencia de las antenas y la densidad de red para longitud del dipolo de λ . El radio de cobertura de los sensores es 250 m.	66
Figura 58.- Número de mensajes recibidos en el nodo destino según la densidad de la red para eficiencias desde el 5% al 100%. (se incrementa en pasos de 5%). Antena dipolo de longitud 0.2λ	67
Figura 59.- Número de mensajes recibidos en el nodo destino según la densidad de la red para eficiencias desde el 5% al 100%. (se incrementa en pasos de 5%). Antena dipolo de longitud 0.6λ	68
Figura 60.- Número de mensajes recibidos en el nodo destino según la densidad de la red para eficiencias desde el 5% al 100%. (se incrementa en pasos de 5%). Antena dipolo de longitud λ	68
Figura 61.- Número de mensajes recibidos en el nodo destino cuando varía la eficiencia de las antenas para distintas longitudes de dipolo (modelo 3D) en una red de 100 nodos. Se incluyen resultados para la red con antenas ideales. El radio de cobertura de los sensores es 250 m.	69
Figura 62.- Número de mensajes recibidos en el nodo destino cuando varía la eficiencia de las antenas para distintas longitudes de dipolo (modelo 3D) en una red de 100 nodos. Se incluyen resultados para la red con antenas ideales. El radio de cobertura de los sensores es 300 m.	70
Figura 63.- Número de mensajes recibidos en el nodo destino cuando varía la eficiencia de las antenas y el radio de cobertura de los sensores para en una red de 100 nodos y longitud del dipolo igual a (a) 0.2λ , (b) 0.4λ , (c) 0.6λ , y (d) 0.8λ (modelo 3D).	71
Figura 64.- Número de mensajes recibidos en el nodo destino cuando varía la eficiencia de las antenas y el radio de cobertura de los sensores para en una red de 100 nodos y longitud del dipolo igual a λ (modelo 3D).	72
Figura 65.- Número de mensajes recibidos en el nodo destino cuando varía la eficiencia de las antenas para distintas longitudes de dipolo (modelo 3D) en una red de 70 nodos. También se incluyen resultados para la red con antenas ideales. El radio de cobertura de los sensores es 250 m.	72
Figura 66.- Número de mensajes recibidos en el nodo destino cuando varía la eficiencia de las antenas para distintas longitudes de dipolo (modelo 3D) en una red de 85 nodos. También se incluyen resultados para la red con antenas ideales. El radio de cobertura de los sensores es 250 m.	73
Figura 67.- Número de mensajes recibidos en el nodo destino cuando varía la eficiencia de las antenas para distintas longitudes de dipolo (modelo 3D) en una red de 115 nodos. También se incluyen resultados para la red con antenas ideales. El radio de cobertura de los sensores es 250 m.	73
Figura 68.- Número de mensajes recibidos en el nodo destino cuando varía la eficiencia de las antenas para distintas longitudes de dipolo (modelo 3D) en	

una red de 130 nodos. También se incluyen resultados para la red con antenas ideales. El radio de cobertura de los sensores es 250 m.	74
Figura 69.- Número de mensajes recibidos en el nodo destino cuando varía la eficiencia de las antenas y la densidad de red para longitud del dipolo de 0.2λ (modelo 3D). El radio de cobertura de los sensores es 250 m.	74
Figura 70.- Número de mensajes recibidos en el nodo destino cuando varía la eficiencia de las antenas y la densidad de red para longitud del dipolo de 0.4λ (modelo 3D). El radio de cobertura de los sensores es 250 m.	75
Figura 71.- Número de mensajes recibidos en el nodo destino cuando varía la eficiencia de las antenas y la densidad de red para longitud del dipolo de 0.6λ (modelo 3D). El radio de cobertura de los sensores es 250 m.	75
Figura 72.- Número de mensajes recibidos en el nodo destino cuando varía la eficiencia de las antenas y la densidad de red para longitud del dipolo de 0.8λ (modelo 3D). El radio de cobertura de los sensores es 250 m.	76
Figura 73.- Número de mensajes recibidos en el nodo destino cuando varía la eficiencia de las antenas y la densidad de red para longitud del dipolo de λ (modelo 3D). El radio de cobertura de los sensores es 250 m.	76
Figura 74.- Número de mensajes recibidos en el nodo destino según el número de nodos de la red, para redes con antenas reales.	77

Lista de Tablas

Tabla 1. - <i>Número de nodos-sensores de la red y su densidad por hm^2.</i>	22
Tabla 2. - <i>Valores del ángulo α para el ejemplo de dos sensores.</i>	33
Tabla 3. - <i>Valores de directividad en dB de la antena real definida en [24].</i>	42
Tabla 4. - <i>Valores de directividad en dB de la antena real definida en [4].</i>	43
Tabla A. 1. - <i>Resumen de las tareas del proyecto</i>	86
Tabla A. 2. - <i>Desglose del presupuesto</i>	87

Capítulo 1

Introducción y objetivos

Recientemente, las redes de sensores inalámbricas (*Wireless Sensor Network*) han recibido una gran atención debido a su enorme potencial para conocer, controlar, mejorar y cambiar la forma en que las personas interactúan con el entorno. La naturaleza peculiar de las redes de sensores ha dado lugar a una intensa actividad investigadora en diferentes campos (electrónica, procesamiento de señal, comunicaciones) dado el potencial de sus aplicaciones y el gran número de desafíos tecnológicos que plantean.

Típicamente, una red de sensores inalámbrica está formada por un número de nodos sensores de reducido tamaño, bajo coste y consumo de energía, que se comunican entre ellos sin necesidad de infraestructura, y recogen información de la región de interés en la que son desplegados, transmitiéndola a un nodo destino. Este tipo de redes ha posibilitado el desarrollo de nuevas aplicaciones y servicios donde las redes tradicionales no son viables. De hecho, las aplicaciones posibles son prácticamente ilimitadas, como la monitorización medioambiental y de especies animales, monitorización sanitaria y médica, localización y seguimiento de flotas, seguridad, espacios inteligentes, y robótica entre otras.

Las características de los sensores y de este tipo de redes imponen una serie de limitaciones entre las que destacan las restricciones en memoria, almacenamiento, capacidad de procesamiento, y energía. Así, uno de los principales requisitos que deben cumplir las redes de sensores es ser eficientes en el consumo de energía sin reducir las prestaciones de la red. Los nodos son alimentados mediante baterías que generalmente no son recargables o reemplazables. Esta limitación en el uso de la energía implica que las funciones que realiza el nodo (detectar, procesar y transmitir los datos) puedan verse alteradas con el fin de garantizar un tiempo de vida de la red razonable. Por eso, para evitar influir críticamente en las capacidades y condiciones de funcionamiento de los sensores se han desarrollado múltiples estrategias de control energético a todos los niveles, como son el uso de componentes electrónicos de bajo consumo, el diseño de sistemas operativos y arquitecturas de red específicos, estrategias de transmisión que

reduzcan las comunicaciones de la red y el desarrollo de protocolos energéticamente eficientes, por citar algunas.

Las comunicaciones entre sensores se establecen generalmente por medio de enlaces inalámbricos de bajo ancho de banda, a través de antenas. De forma que las limitaciones anteriormente mencionadas de las redes de sensores se han extendido también al diseño de las antenas. Diferentes trabajos del estado del arte están enfocados a minimizar el tamaño de la antena maximizando la eficiencia de la misma [1] [2]. En otros estudios, las antenas se diseñan específicamente para la aplicación en la que se van a utilizar [3] [4].

Sin embargo, pocos trabajos se han centrado en hacer un estudio conjunto de cómo las decisiones sobre la elección de las características y tipos de las antenas de los sensores influyen en las prestaciones de la red. Por eso, el objetivo principal de este Proyecto Fin de Carrera es estudiar y evaluar la influencia de las características radiantes de los sensores sobre las prestaciones de la red formada por un gran número de estos dispositivos.

Este estudio es importante ya que el poder optimizar el diseño de la antena que se utiliza en función de los requerimientos de la red garantiza mejores funcionalidades a la vez que permite diseñar el sistema con el número óptimo de dispositivos. Parámetros de radiación como la eficiencia y directividad de la antena transmisora y receptora, tipo de antena o el diagrama de radiación son analizados en este proyecto. Además, el hecho de considerar diferentes densidades de redes y radios de cobertura de los nodos sensores es útil para poder establecer algunas guías de diseño de las redes.

En concreto, se parte del trabajo desarrollado en [5], en el que se evalúa cómo influye la eficiencia de algunos tipos de antenas sobre las prestaciones de redes de sensores para diferentes topologías. Haciendo uso del modelo de distancias equivalentes definido en [5], se incluye el diagrama de radiación del sensor (correspondiente a una antena omnidireccional, dipolo de diferente longitud tanto en dos como en tres dimensiones) como una función matemática que expresa la directividad de la antena en función de las coordenadas espaciales. Además, se analizan las prestaciones de red para distintos radios de cobertura del sensor y diferentes densidades de red. Para completar el estudio y adaptarlo a situaciones más reales, se analizan las prestaciones para topologías de redes donde los sensores poseen diagramas de radiación que se corresponden a los generados por antenas reales.

La caracterización de las prestaciones se realiza cuantificando el número de mensajes que se reciben con éxito en el nodo destino. Evaluar el funcionamiento de la red en función de los parámetros radiantes de los dispositivos puede proporcionar información adicional para hacer un mejor diseño de la red y del sistema de comunicaciones.

MATLAB es la herramienta informática utilizada para la generación de los escenarios necesarios y para realizar las simulaciones con las que se obtienen el número de mensajes recibidos en el nodo destino.

Finalmente, indicamos la forma en la que está estructurada esta memoria. En el Capítulo 2 se realiza una revisión de la literatura sobre los conceptos e investigaciones

más relevantes de las redes de sensores, así como de las antenas que se utilizan en ellas. En el Capítulo 3 se define el entorno de trabajo y los escenarios en los que se van a simular las redes de sensores. En el Capítulo 4 se presentan los resultados obtenidos en las simulaciones en los distintos escenarios considerados. Por último, en el Capítulo 5 se exponen las principales conclusiones obtenidas, así como las posibles líneas de investigación futuras derivadas de este Proyecto Fin de Carrera.

Capítulo 2

Estado del Arte

2.1. Redes de sensores inalámbricas

2.1.1. Introducción

En los últimos años, los avances en la electrónica y la informática han cambiado el panorama tecnológico actual, haciéndolo mucho más cercano y necesario para las personas. La reducción en los costes de fabricación de los dispositivos (ordenadores, teléfonos móviles, procesadores, routers, etc.) producidos a gran escala, y la demanda por parte de los usuarios de nuevas aplicaciones han dado paso al desarrollo de nuevos sistemas y redes de comunicaciones. En este sentido, las denominadas redes de sensores inalámbricas, WSN¹, han surgido como una nueva tecnología que se está implantando en diversos campos, como la monitorización medioambiental y de especies animales, medicina, robótica y aplicaciones militares [5], con proyectos como *Smart Dust* o *NEST*, desarrollados por DARPA².

Una red de sensores inalámbrica consiste en un conjunto de dispositivos (desde cientos a miles), denominados *nodos*, que mediante un protocolo de comunicación intercambian información entre ellos a través de un medio inalámbrico, con el fin de monitorizar cooperativamente determinados parámetros físicos del entorno para su posterior estudio y análisis [6]. Los nodos se distribuyen en el área de interés, llamado *campo de sensores*, formando una red inalámbrica sin infraestructura física preestablecida ni administración central donde los nodos se tienen que autoorganizar. Los nodos sensores recogen la información requerida dependiendo de la aplicación (medidas de luz, temperatura, humedad, etc.), en algunos casos realizan un simple procesamiento de los datos extraídos, y los encaminan, habitualmente a través de múltiples saltos, a otro “nodo destino”, denominado *sink*. Allí se almacenan y procesan los datos para poder estudiar el fenómeno en cuestión. El *sink* puede ser un nodo sensor igual al

¹ WSN: *Wireless Sensor Networks*.

² DARPA: *Defense Advanced Research Projects Agency*.

resto que conforman la red, o un equipo superior que pueda interconectar la red de sensores con otras redes de infraestructura (y así con el usuario final) [6] (véase Figura 1), siendo la última opción la más habitual.

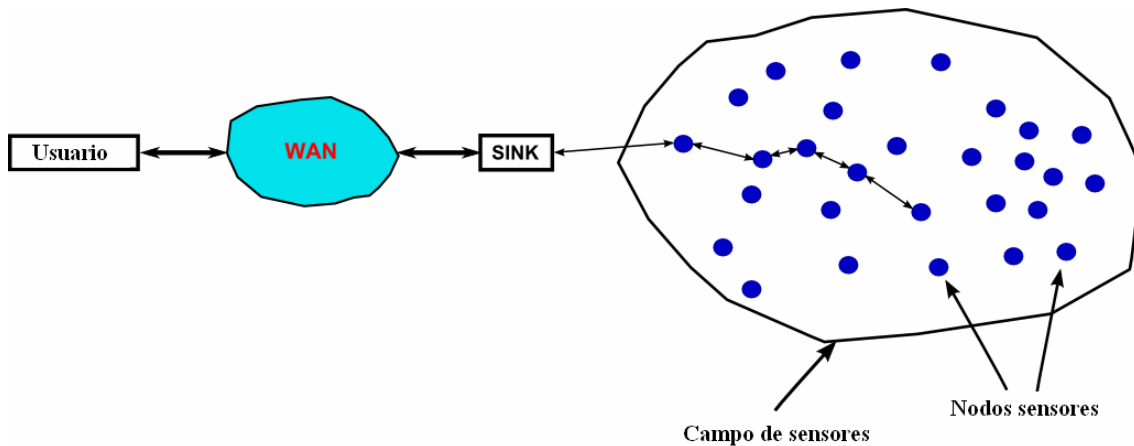


Figura 1.- Esquema del despliegue de una red inalámbrica de sensores, WSN, y conexión con otras redes y con el usuario a través del sink.

Dado que el despliegue de una red de sensores se puede adaptar a cualquier escenario (de especial interés son los terrenos de difícil acceso), el interés de los investigadores por esta nueva tecnología ha crecido notablemente en los últimos tiempos, fundamentalmente debido a sus potenciales aplicaciones y retos tecnológicos.

2.1.2. Características de las redes de sensores

Algunas características de las WSN son [7]:

- Los nodos están densamente desplegados.
- Las redes de sensores inalámbricas son tolerantes a fallos.
- La topología de una red de sensores cambia muy frecuentemente.
- Heterogeneidad: los nodos sensores pueden variar en fabricante, capacidades de cómputo y memoria, interfaces de comunicación, etc.
- Calidad de servicio. Podrían existir aplicaciones en las cuales la captación de eventos por los sensores sea crítica.

La arquitectura de un nodo depende del propósito del despliegue de la red de sensores. Sin embargo, es posible definir un modelo general, tal y como se muestra en la Figura 2. Cada nodo contiene sensores para medir parámetros del fenómeno de interés, un microprocesador para controlar el funcionamiento del dispositivo, una pequeña memoria para almacenar los datos que miden los sensores, baterías y un transceptor encargado de las comunicaciones con el resto de nodos.

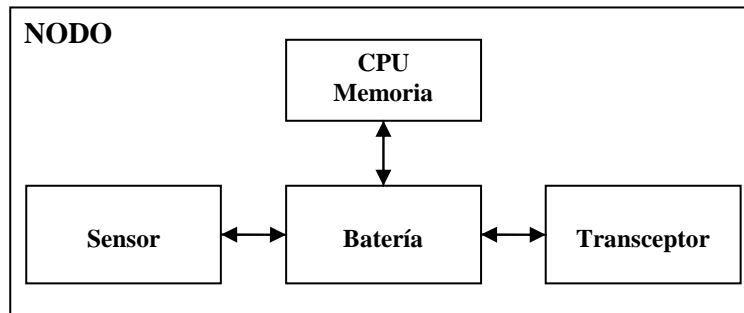


Figura 2.- *Arquitectura de un nodo sensor.*

En el mercado actual existen gran variedad de tipos de nodos sensores. En la Figura 3 se muestran diferentes nodos sensores fabricados por Crossbow Technology Inc. [8].

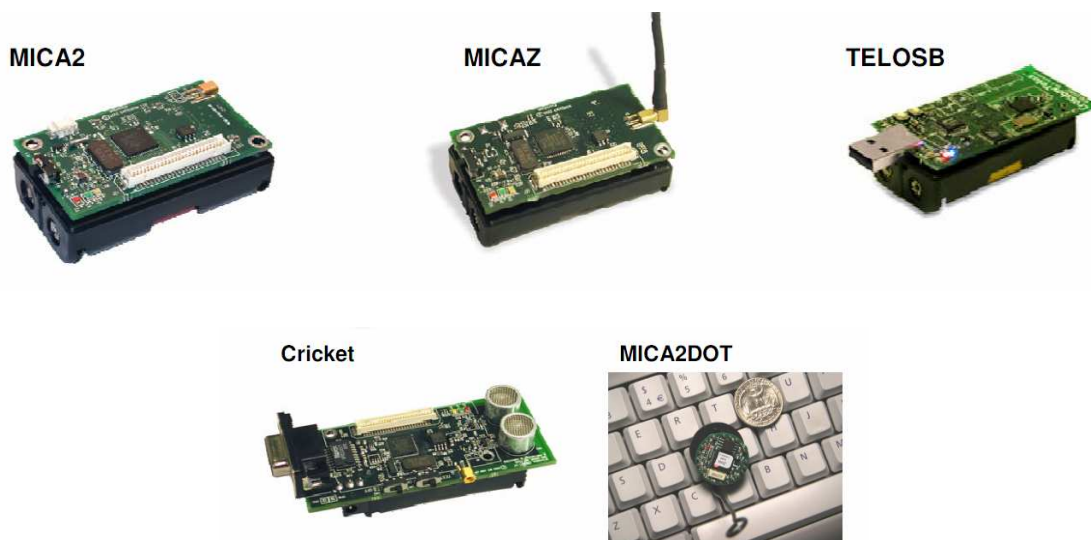


Figura 3.- *Equipos de motas reales*

A continuación se van a detallar algunos aspectos de las redes de sensores.

Despliegue

La disposición de los nodos en el campo de sensores puede ser aleatoria, o bien se pueden colocar de forma intencionada. Esto permite que las WSN se utilicen en aplicaciones muy diferentes. El despliegue de la red de sensores se puede hacer de una sola vez, de forma que se despliegan todos los nodos y no se les da un mantenimiento (por ejemplo, cuando el despliegue se realiza desde un avión para monitorizar una zona remota de difícil acceso); o puede ser un proceso continuo, donde se introducen nuevos nodos durante el tiempo de vida de la red para reemplazar a nodos inactivos, o dar cobertura a cierta área de interés, por ejemplo [9].

Movilidad

Los nodos sensores pueden cambiar de posición después del despliegue inicial. Los cambios en la posición pueden deberse a requerimientos de la aplicación, involucrando a unos pocos nodos o a la totalidad de los mismos. Por otro lado, el movimiento de los nodos sensores puede producirse de forma ocasional o continuada. El grado de movilidad de los nodos influye directamente en la topología de la red, así como en los algoritmos y protocolos de enrutamiento que se utilizan. La movilidad puede ser pasiva, donde el nodo no tiene capacidades para cambiar de posición pero la movilidad se la proporciona el elemento sobre el que se encuentra colocado, (por ejemplo, en la monitorización de flotas de vehículos o sensores en animales), o activa ya que el propio nodo tiene capacidad de moverse. En cualquier caso, los nodos tienen que ser capaces de comunicar su nueva posición al resto de nodos ya que ha variado su localización, y autoorganizarse para garantizar el funcionamiento de la red y no dejar nodos aislados.

Coste y tamaño

El número de nodos sensores utilizados en una WSN puede ir desde los cientos a miles de unidades, dependiendo del propósito con el que se van a utilizar. Por eso el precio de cada dispositivo es crítico, ya que si el coste de desplegar una red de sensores es superior al de una red inalámbrica convencional no está justificada su implantación. Siempre y cuando la aplicación, es posible desplegar nodos sensores más potentes, pero el coste del dispositivo se encarece. En este sentido, los nodos pueden variar su precio desde unos pocos céntimos de euro, hasta cientos de euros.

Por otro lado, el tamaño de los sensores depende igualmente de la aplicación para la que estén destinados, influyendo además su tamaño de forma directa en el coste de los mismos. Según [9] y atendiendo a su tamaño físico, los sensores se clasifican en cuatro clases: *caja de cerillas*, *bloque*, *grano* y *polvo*. Por ejemplo, en tareas de vigilancia (aplicación militar) se emplean sensores muy pequeños - tipo *polvo* - para que puedan pasar inadvertidos. Sin embargo, en las aplicaciones meteorológicas se utilizan sensores tipo *caja de cerillas*.

Heterogeneidad

Dada la diversidad de tipos de nodos y el amplio abanico de aplicaciones en las que se utilizan las redes de sensores, éstas pueden ser heterogéneas, es decir, los nodos no tienen por qué ser idénticos. El grado de heterogeneidad de una red de sensores es un factor importante ya que afecta a la complejidad del software y a la administración de todo el sistema.

Sin embargo, es habitual encontrar redes de sensores homogéneas. De hecho, en muchos trabajos del estado del arte se parte de la suposición de igualdad en el tipo de nodos [10].

Medio de transmisión

El uso de ondas radio para establecer los enlaces entre nodos es el medio de transmisión habitual en una red de sensores. La razón principal es que no requiere de línea de visión directa entre nodos para comunicarse en áreas no muy extensas, además de su bajo consumo y antenas de tamaño relativamente pequeño (para la banda de pocos GHz). Otro medio de transmisión empleado es el óptico, pero exige tener línea de visión directa entre los dispositivos. Por ejemplo, en el proyecto *Smart Dust*³ se ha utilizado un láser para la comunicación entre nodos [11].

Los sonidos o ultrasonidos se utilizan típicamente en comunicaciones bajo el mar, o para grandes distancias. En ocasiones, varias modalidades de comunicación se usan en el mismo sistema de red de sensores.

Infraestructura

El despliegue de los nodos puede diferir de una red a otra. Puede haber redes con o sin infraestructura. En las redes con infraestructura, los nodos se colocan en lugares predeterminados para proporcionar cobertura y existen unas estaciones base que se encargan de gestionar la red. Los nodos sólo pueden comunicarse cuando lo indica la estación base. Dependiendo de la densidad de nodos que presente la red, es posible encontrar casos con más de una estación base.

En las redes sin infraestructura, los nodos se pueden comunicar entre ellos sin necesidad de una estación base. Los nodos se despliegan aleatoriamente y tienen que ser capaces de auto organizarse para formar la red de sensores.

En general, el despliegue de una infraestructura es un proceso costoso y en ocasiones imposible de llevar a cabo por las condiciones del terreno. Por este motivo se prefieren redes sin infraestructura.

Topologías de red

Es necesario en el despliegue definir la topología de red que se va a utilizar. Hay tres topologías básicas usadas en WSN: topología en *estrella*, en *árbol* y en *mall*a (véase Figura 4). La topología en estrella es la más sencilla, donde todos los nodos se conectan directamente al sink (que puede realizar funciones de puerta de enlace a redes con infraestructura), y manteniendo una sola ruta de comunicación con él. El tamaño de la red está limitado a la distancia a la que puede transmitir un nodo sensor. Para solucionar este problema, la topología en árbol permite que ciertos nodos de la red se utilicen como enrutadores, manteniendo una sola trayectoria de comunicación entre un nodo sensor y el sink. Sin embargo tiene un inconveniente: si se cae un nodo que está siendo utilizado como enrutador, las rutas que pasan por él se pierden, con lo que parte de la red de sensores queda desconectada del resto.

³ El término *Smart Dust* (“polvo inteligente”) fue introducido por Kristofer Pister de la Universidad de California.

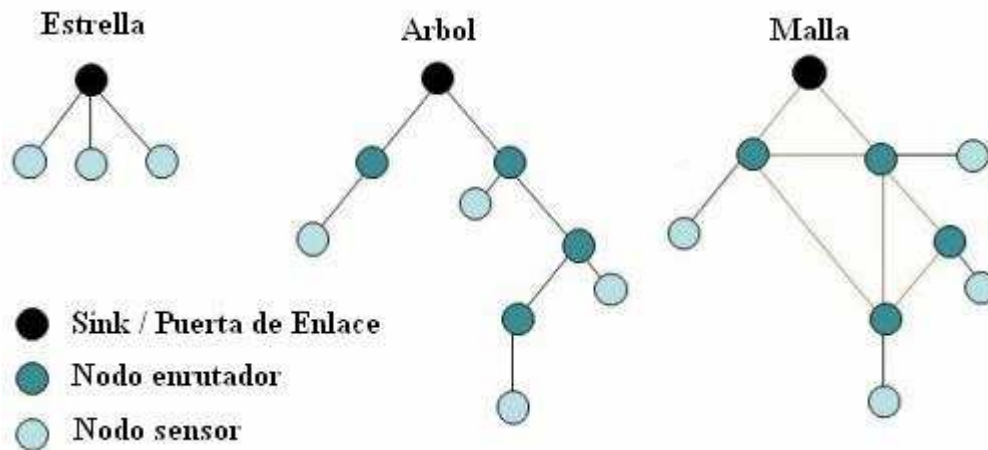


Figura 4.- Topologías típicas de las redes de sensores.

Por último, la topología en malla soluciona el problema anterior al ofrecer más de una ruta de comunicación entre cada nodo y el sink. Con esta configuración, si un nodo enrutador falla, la red se reconfigura para establecer una nueva ruta hacia el sink [7].

Cobertura y tamaño de la red

La cobertura de un nodo sensor es el radio al que es capaz de transmitir o recibir información. La cobertura de una red de sensores depende de la cobertura que tengan los nodos, del número que se despliegan y la localización física de los mismos. Así, cuando la densidad de la red es escasa, los sensores sólo cubren una parte del área de interés [9].

Conectividad

La cobertura de los nodos y su localización física definen la conectividad de la red de sensores. Puede ser una red conectada, si todos los nodos pueden transmitir, es decir, todos los nodos tienen como mínimo un nodo vecino con el que comunicarse. Por el contrario, se dice que la red es esporádica si los nodos sensores están la mayor parte del tiempo aislados. En estas redes, ocasionalmente puede entrar a formar parte de la red un nodo sensor que origine conectividad con otros nodos, estableciendo comunicación. Si la red queda dividida ocasionalmente, se dice que la conectividad es intermitente [9].

Consumo de potencia

El uso eficiente de la energía de los nodos sensores es fundamental en una WSN, ya que en la mayoría de los escenarios la recarga o reemplazo de las baterías es imposible [7]. Por otro lado, los sensores no pueden llevar grandes baterías ya que están limitadas a consumos de < 0.5 Ah y 1.2 V [7]. Por tanto, el tiempo de vida del nodo sensor tiene una fuerte dependencia con el tiempo de vida de las baterías. De esta manera, la conservación de la energía y el uso eficiente de la misma tienen suma importancia. Las funciones principales de un nodo sensor que implican un consumo de potencia son detectar un evento (señal analógica), procesar la señal (conversión

analógico-digital), y transmitir la información. Con todas estas premisas, se han diseñado protocolos y algoritmos que permiten un consumo eficiente de la energía [7].

Tiempo de vida de la red

Dependiendo de la aplicación, el tiempo de vida de una red de sensores puede ir desde unas pocas horas, hasta varios años. Claramente influye el hacer o no un uso eficiente de las baterías de los nodos [1]. El tiempo de vida de una red de sensores tiene varias acepciones. Una de ellas es el tiempo que permanece el *sink* conectado a algún nodo vecino. En este caso, se puede dar la situación de que ciertas zonas del campo de sensores se queden aisladas del resto de la red (nodos que agotan sus baterías) rompiéndose la conectividad con zonas del área de interés. Sin embargo, otros autores consideran que el tiempo de vida de la red es el tiempo que transcurre hasta que el primer nodo de la red agota las baterías.

Con el objetivo de alargar el tiempo de vida de la red, y teniendo en cuenta que el gasto de energía en una comunicación inalámbrica es mayor cuanto mayor es la distancia a la que se desea transmitir, las redes de sensores suelen ser redes multisalto. Se han diseñado protocolos que calculan el gasto de energía necesario para transmitir desde el nodo fuente al nodo destino por varios caminos, y siempre se eligen las rutas con múltiples saltos *pequeños*, es decir, que requieren menor gasto de energía [12].

A la vista de lo anterior, las principales limitaciones son el suministro de energía, las capacidades de cómputo, procesamiento y memoria limitada, y un bajo ancho de banda en las comunicaciones inalámbricas [7]. De todas las restricciones, la limitación de las baterías de los sensores es la más crítica, ya que una vez que los sensores son desplegados tienen que ser capaces de operar durante largos periodos de tiempo sin la intervención del ser humano. Por eso, aparecen diferencias respecto a las redes inalámbricas tradicionales, donde la energía no es un problema ya que los dispositivos poseen fuentes de energía recargables o reemplazables. Así, la prioridad en una WSN es el consumo eficiente de energía para aumentar lo máximo posible el tiempo de vida del sensor, y en última instancia de la red, mientras que en una red tradicional la prioridad es la optimización de la QoS⁴ y la eficiencia del ancho de banda. Por tanto, los algoritmos y mecanismos que se utilizan para las redes tradicionales no son válidos para dar soporte a las características propias de una red de sensores.

2.1.3. Aplicaciones de las redes de sensores inalámbricas

Aunque los beneficios de las redes de sensores se reconocieron rápidamente, inicialmente su aplicación estaba limitada a los sistemas militares. Los avances en las tecnologías cambiaron la situación: la tecnología MEMs, más fiable en redes *wireless* y el bajo coste de producción dio lugar a sensores de pequeño tamaño, baratos y con menor consumo de energía. Este tipo de sensores se puede usar en nuevas aplicaciones, desde la monitorización ambiental hasta aplicaciones industriales, al igual que puede seguir empleándose en las tradicionales aplicaciones militares.

⁴ QoS (*Quality of Service*): Calidad de servicio.

Las redes de sensores pueden estar formadas de muchos tipos diferentes de sensores, como sísmicos, magnéticos de baja tasa de muestreo, visuales, térmicos, infrarrojos, acústicos y radar, que pueden monitorizar una amplia variedad de condiciones ambientales: temperatura, humedad, movimiento de vehículos, presión, niveles de ruido, iluminación, presencia o ausencia de un objeto, características como velocidad, dirección, etc. Por tanto, la cantidad de aplicaciones es elevada.

A continuación se citan algunos ejemplos de aplicaciones concretas.

Aplicaciones Militares

El rápido despliegue, la capacidad de auto-organización, y la tolerancia a fallos los hacen adecuado para este tipo de aplicaciones. La pérdida o destrucción de alguno de ellos por acciones hostiles no afecta a las operaciones militares, ya que se dispone de redes muy densas. Entre las aplicaciones se encuentran la monitorización de fuerzas amigas, equipamiento y municiones, vigilancia del campo de batalla, reconocimiento del terreno y fuerzas enemigas, seguimiento de blancos, evaluación de daños, detección y reconocimiento de ataques nucleares, biológicos y químicos.

Aplicaciones Medioambientales

Destacan las aplicaciones de seguimiento del movimiento de los pájaros, pequeños animales e insectos; monitorización de condiciones medioambientales, planetas y entornos marinos; irrigación; detección de incendios forestales; investigación meteorológica o geofísica; detección de inundaciones (sistema ALERT en USA); estudio de la polución; mapa de bio-complejidad del entorno, precisión en la agricultura, etc [7].

Aplicaciones en el área de la Salud

Algunas aplicaciones de este campo son la monitorización de pacientes, diagnósticos, administración de medicamentos en hospitales, interfaces para disminuidos, seguimiento de médicos en un hospital, etc [13].

Aplicaciones en el hogar

La automatización de las tareas del hogar, el entorno inteligente, la seguridad en las instalaciones son algunos de los ejemplos de aplicaciones en este campo [7].

Otras aplicaciones comerciales

Otras aplicaciones comerciales son la construcción de oficinas inteligentes, control medioambiental en los edificios de oficinas, museos interactivos, monitorización de áreas de desastres, seguimiento y detección de vehículos, control del tráfico, monitorización industrial, seguridad frente a ataques externos, seguridad en infraestructuras, etc.

2.2. Antenas

2.2.1. Introducción

El *Diccionario Webster's*⁵ define *antena* como un dispositivo metálico para radiar o recibir ondas de radio. El IEEE⁶ la define como una estructura entre el espacio libre y un dispositivo de guiado. En otras palabras, una antena es un dispositivo capaz de transformar energía electromagnética guiada a energía electromagnética radiada y viceversa. El medio guiado puede ser un cable coaxial o una guía de ondas, que transporta la energía de la fuente a la antena, o de la antena al receptor. La Figura 5 muestra el equivalente de *Thevenin* de una antena en modo transmisión en condiciones ideales [14].

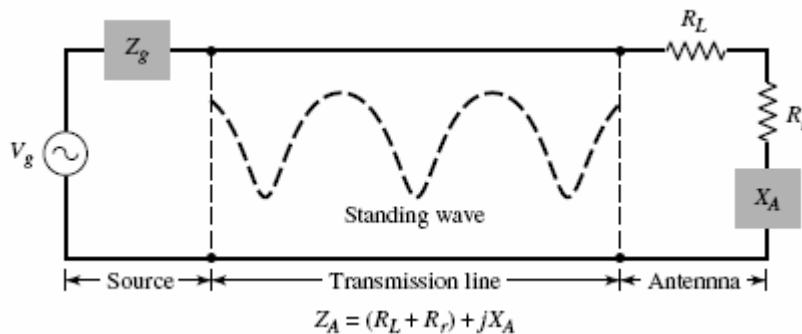


Figura 5.- *Equivalente de Thevenin de una antena en modo transmisión conectada a la fuente a través de una línea de transmisión.*

Según la Figura 5 la impedancia de la antena es $Z_A = (R_L + R_r) + jX_A$ siendo R_L pérdidas en los conductores y dieléctricos de la antena, R_r la resistencia de radiación y X_A la parte imaginaria de la impedancia de radiación de la antena. En condiciones ideales, toda la energía generada por la fuente se debería transferir a la R_r . Sin embargo, en realidad existen pérdidas en los conductores y dieléctricos tanto de la línea de transmisión como en la antena (R_L). También se crean reflexiones en la unión de la línea de transmisión con la antena (producidas por una desadaptación entre la impedancia de ambos elementos).

Los estudios sobre las antenas tienen su comienzo cuando James Clerk Maxwell unificó las teorías sobre electricidad y magnetismo y formuló las que se conocen como *ecuaciones de Maxwell*. El trabajo lo publicó por primera vez en 1873 [15]. También demostró que la luz y las ondas electromagnéticas viajan a la misma velocidad. En 1886 el profesor Heinrich Rudolph Hertz fue capaz de construir en su laboratorio un dipolo $\lambda/2$. Pero no fue hasta 1901 cuando Guglielmo Marconi estableció la primera transmisión transatlántica [14].

Hasta la década de los años 40, la tecnología en antenas se basaba en estudiar los elementos de radiación conocidos hasta entonces en la banda de frecuencias UHF. Fue

⁵ Diccionario Webster's: Publicado por Noah Webster en *An American Dictionary of the English Language* en 1828.

⁶ IEEE: *Institute of Electrical and Electronics Engineers*.

con la segunda guerra mundial cuando se introducen nuevos elementos en las antenas, como son las aperturas y reflectores. Otro factor que contribuyó al comienzo de una nueva era en las antenas fue la invención de fuentes de microondas que generan frecuencias de 1 GHz en adelante. En los años 60 se introdujeron métodos numéricos para el cálculo y diseño de antenas, si bien, en el pasado esto quedaba en un segundo plano, hoy en día es un aspecto prioritario en el diseño de los sistemas de telecomunicaciones [14].

2.2.2. Parámetros fundamentales de antenas

A continuación se introducen brevemente los parámetros fundamentales de las antenas.

Diagrama de radiación

Es la distribución espacial de alguna propiedad del campo emitido por una antena. En la mayoría de los casos el diagrama de radiación se representa para *campo lejano*. Las propiedades de radiación pueden ser densidad de potencia, intensidad de radiación, intensidad de campo, directividad, fase o polarización [14].

Densidad de potencia radiada

Las ondas electromagnéticas se utilizan para transportar información de un punto a otro a través de medios guiados o no guiados. Se define la potencia radiada como [14]:

$$P_{rad} = \oint_s W_{rad} ds = \frac{1}{2} \oint_s \text{Re}(E \times H^*) ds \quad (2.1)$$

donde es W_{rad} la densidad de radiación en W/m^2 y E y H los campos eléctrico y magnético respectivamente.

Intensidad de radiación

La intensidad de radiación en una dirección dada se define como la potencia radiada por la antena por unidad de ángulo sólido. Es un parámetro que se mide en *campo lejano* y se expresa [14]:

$$U = r^2 W_{rad} \quad (2.2)$$

donde U es la intensidad de radiación ($\text{W}/\text{áng. sólido}$) y W_{rad} la densidad de radiación en W/m^2 . En campo lejano la expresión para la intensidad de radiación queda [14]:

$$U(\theta, \phi) = \frac{1}{2\eta} \left[|E_\theta^0(\theta, \phi)|^2 + |E_\phi^0(\theta, \phi)|^2 \right] \quad (2.3)$$

siendo η la impedancia intrínseca del medio y E_θ^0 y E_ϕ^0 componentes del campo eléctrico en campo lejano. Por tanto la potencia radiada (2.1) se puede escribir como [14]:

$$P_{rad} = \oint\oint U d\Omega = \int_0^{2\pi} \int_0^\pi U \sin \theta d\theta d\phi \quad (2.4)$$

donde el diferencial de ángulo sólido es $d\Omega = \sin \theta d\theta d\phi$.

Directividad

La directividad es la relación entre la intensidad de radiación de la antena en una dirección dada con respecto a la intensidad de radiación de una fuente isotrópica. Matemáticamente se expresa como [14]:

$$D = \frac{U}{U_0} = \frac{4\pi U}{P_{rad}} \quad (2.5)$$

donde U es la intensidad de radiación de la antena y U_0 la intensidad de radiación de una fuente ideal. Si no se especifica una dirección, se define la directividad máxima de la antena como [14]:

$$D_{max} = D_0 = \frac{U_{max}}{U_0} = \frac{4\pi U_{max}}{P_{rad}} \quad (2.6)$$

Para una fuente isotrópica es evidente que la directividad es igual a 1, ya que tanto U, U_{max} y U_0 tienen el mismo valor.

Eficiencia

La eficiencia total de una antena, e_0 , integra las pérdidas que se producen en los terminales de entrada, así como a lo largo de la estructura de la antena. Se deben a dos efectos: pérdidas en los conductores y dieléctricos, y pérdidas por reflexión entre la línea de transmisión y la antena. En general, se puede escribir la eficiencia total de una antena como [14]:

$$e_0 = e_r e_c e_d \quad (2.7)$$

donde e_r son las pérdidas por reflexión, e_c y e_d son las debidas a los conductores y dieléctricos, respectivamente. Normalmente, tanto e_c como e_d son difíciles de calcular y se determinan experimentalmente. Se puede reescribir (2.7) como [14]:

$$e_0 = e_r e_{cd} = e_{cd} (1 - |\Gamma|^2) \quad (2.8)$$

siendo e_{cd} la eficiencia de radiación de la antena y Γ el coeficiente de reflexión de la línea de transmisión. La eficiencia de radiación de la antena se calcula [14]:

$$e_{cd} = e_c e_d \quad (2.9)$$

Ganancia

La ganancia de una antena en una dirección dada se define como la relación entre la intensidad de radiación en la dirección dada, y la intensidad de radiación que se debería obtener si toda la potencia que acepta la entrada de la antena se radiara isotrópicamente. La intensidad de radiación que corresponde a la potencia radiada isotrópicamente es igual a la potencia aceptada a la entrada de la antena P_{in} dividida por 4π . Matemáticamente se expresa como [14]:

$$G = 4\pi \frac{\text{intensidad de radiación}}{\text{potencia de entrada}} = 4\pi \frac{U(\theta, \phi)}{P_{in}} \quad (2.10)$$

Se puede relacionar la potencia radiada por la antena con la potencia que se suministra a la entrada mediante la eficiencia de la antena. El IEEE no incluye las pérdidas por reflexión ni por polarización [14]. Así, se puede escribir [14]:

$$P_{rad} = e_{cd} P_{in} \quad (2.11)$$

donde e_{cd} es la eficiencia de radiación de la antena definida en (2.9). Haciendo uso de (2.11) podemos expresar la ganancia de la antena (2.10) como:

$$G(\theta, \phi) = e_{cd} \left[4\pi \frac{U(\theta, \phi)}{P_{rad}} \right] \quad (2.12)$$

y por medio de (2.5) se relaciona la ganancia de la antena con la directividad según [14]:

$$G(\theta, \phi) = e_{cd} D(\theta, \phi) \quad (2.13)$$

Ancho de banda

El ancho de banda de una antena se define como el rango de frecuencias dentro del cual el rendimiento de la antena, con respecto a una característica, se ajusta a una norma concreta. Por tanto, se pueden definir distintos anchos de banda en una misma antena, dependiendo de la característica de radiación que se quiera medir.

Para antenas de banda ancha, éste se expresa como la relación de la frecuencia mayor con respecto a la frecuencia más baja aceptable. Por ejemplo un ancho de banda de 10:1 indica que la frecuencia superior es 10 veces más grande que la frecuencia más pequeña. En antenas de banda estrecha se suele dar el ancho de banda en tanto por ciento alrededor de la frecuencia central del ancho de banda. Así un 5% de ancho de

banda significa que el rango de frecuencias está comprendido entre un $\pm 5\%$ de la frecuencia central del ancho de banda 0

2.2.3. Antenas en sensores inalámbricos

La miniaturización de los nodos sensores involucra a cinco tecnologías diferentes: antenas, circuitos de radio-frecuencia, circuitos digitales de banda base, baterías químicas y circuitos de sensores [16]. Esta sección se centra en el análisis y diseño de las antenas que se utilizan en las redes de sensores.

El tamaño de los nodos presentes en las redes de sensores delimita las dimensiones de antena que se puede emplear. En general, las antenas que se utilizan en redes de sensores inalámbricas son pequeñas en relación a la longitud de onda de la frecuencia de trabajo.

Históricamente ha habido un especial interés por las llamadas antenas eléctricamente pequeñas. Con el aumento del uso de las comunicaciones inalámbricas y la proliferación de las redes de sensores, se siguen desarrollando múltiples trabajos en este tipo de antenas [17].

A finales de los años 40, Wheeler y Chu fueron los primeros en examinar las propiedades radiantes de las antenas eléctricamente pequeñas, ESA⁷ [18]. Una antena eléctricamente pequeña es aquella cuyas dimensiones son más pequeñas que la longitud de onda de los campos electromagnéticos que radia [19]. Wheeler definió una ESA como una antena cuyas máximas dimensiones son más pequeñas que $\frac{\lambda}{2\pi}$ [20]. La relación se puede expresar como [1]:

$$ka < 1 \quad (2.14)$$

donde $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ en rad/m, λ la longitud de onda en espacio libre y a el radio de la esfera que engloba la máxima dimensión de la antena.

Una antena mucho más pequeña que la longitud de onda está sujeta a limitaciones que se pueden formular de forma sencilla [20]. A partir de los trabajos de Wheeler y Chu, varias formulas numéricas se crean para describir las limitaciones de la antena y disminuir su tamaño físico. Una de las limitaciones más importante es un alto factor de calidad de radiación Q , que limita el ancho de banda de operación de las antenas en el que existe una eficiencia de radiación aceptable [18]. Las antenas eléctricamente pequeñas tienen valores de eficiencia muy bajos, típicamente entre el 1-50% [18].

Una definición comúnmente aceptada para Q es [18]:

$$Q = \frac{2\omega W}{P} \quad (2.15)$$

⁷ ESA: *Electrically Small Antenna*

donde W es el promedio de la energía almacenada en la red, P es la potencia disipada en la red y ω es la velocidad angular, $2\pi f$ [18].

El factor de radiación Q es inversamente proporcional al ancho de banda y muchas veces se prefiere un alto Q a costa de tener un ancho de banda más estrecho [18]. Hansen desarrolló una teoría sobre el límite del valor más bajo de Q para antenas ESA y llegó a la relación entre el tamaño físico de la antena y Q [15]. Hay que señalar que este límite en el valor del Q mínimo es aplicable a antenas eléctricamente pequeñas que excitan el modo TE o TM por separado [18].

A principios de los años 90, Dale M. Grimes y Craig A. Grimes afirmaron haber encontrado matemáticamente la manera de operar juntos los modos TE y TM en antenas ESA, aumentando el valor límite de Q establecido por Wheeler y Chu [18]. Los beneficios de utilizar los dos modos de propagación conjuntamente se traducen en un Q más bajo, una mayor intensidad de radiación, o lo que es lo mismo una mayor ganancia, potencia radiada o eficiencia de radiación [18]. El problema es que son difíciles de implementar físicamente.

2.3. Motivación de este Proyecto Fin de Carrera

Las redes de sensores inalámbricas, a día de hoy, son una de las tecnologías en las que se están depositando muchas esperanzas. Este es un motivo por el cual se han realizado múltiples trabajos que estudian las distintas capas del sistema de comunicaciones, desde la capa física a la capa de aplicaciones [5].

El auge de esta nueva tecnología impulsa el desarrollo de nuevos algoritmos y protocolos con el objetivo de superar las limitaciones propias de las redes de sensores, en particular, el consumo de energía, sin mermar las prestaciones de la red. Diferentes técnicas y mecanismos se han propuesto para reducir los costes de energía de las comunicaciones y disminuir, por tanto, el consumo de energía en los dispositivos [12] [21]. También se han propuesto algoritmos de enrutamiento eficientes en energía, que buscan la ruta hacia el destino más eficiente en cuanto al gasto de energía se refiere (se consume más energía cuanto mayor sea la distancia entre el transmisor y el receptor). En el control de acceso al medio se han definido protocolos específicos para redes de sensores capaces de crear la infraestructura de la red y que los nodos compartan de manera eficiente los recursos de la misma [7]. Otras técnicas maximizan el tiempo de vida de la red alternando los estados de activo/inactivo en los nodos [12]. En la capa física se han propuesto esquemas de modulación, eficiencia en la potencia con la que se transmite y los efectos de propagación de la señal [7]. También se definen las bandas de frecuencia, los canales disponibles, alcance y velocidad de las transmisiones inalámbricas [6].

Por tanto, la eficiencia en la energía es primordial en este tipo de redes y gran parte del estado del arte está centrado en proporcionar mecanismos y algoritmos de ahorro energético para alargar el tiempo de vida de las redes, sin que ello implique una reducción en las prestaciones y funcionalidades de la red.

Por otro lado, como es obvio, las redes de sensores inalámbricas hacen uso de antenas para dotar al sistema de funcionalidad. La elección de la antena es algo

fundamental y que debe ser estudiado con el fin de garantizar las prestaciones requeridas por la aplicación para la cual se despliega la red.

Teniendo en cuenta que el número de nodos que componen las redes de sensores suele ser elevado, la elección de las antenas se convierte en un factor crítico en el diseño y planificación del sistema de comunicaciones, así como en el coste final. La literatura es rica y amplia en estudios basados en el diseño de antenas para aplicaciones concretas [3] [4], o bien, en mejorar la eficiencia de la antena y minimizar su tamaño [1] [2].

Sin embargo, en la mayoría de estos trabajos no anexionan las características de los elementos radiantes de las antenas a los modelos de red. Al ser las antenas un elemento imprescindible en las redes de sensores inalámbricas, es interesante conocer cómo influyen sus características sobre las prestaciones para hacer un buen diseño tanto la red como de los dispositivos. Así, puede ocurrir que en determinadas aplicaciones se puedan utilizar antenas menos idóneas pero más baratas que dotan a la red de las funcionalidades requeridas [5]. Esto es precisamente lo que se aborda en este Proyecto Fin de Carrera y de aquí su interés.

Capítulo 3

Entorno de trabajo y escenarios

En este capítulo se describen el entorno de trabajo y los escenarios en los que se van a realizar las simulaciones. En primer lugar se definen los parámetros de red y de radiación de las antenas necesarios para establecer el entorno de trabajo en el que se van a generar la topologías de red. Estos parámetros tienen valores comunes en la literatura y en aplicaciones reales y no varían una vez son definidos.

En la segunda sección se introducen las características radiantes de los sensores en la generación de las topologías de red. Para dar funcionalidad a la red de sensores es necesario el uso de un algoritmo de enrutamiento capaz de hacer llegar el mensaje desde el nodo fuente al nodo destino. En la tercera sección de este capítulo se describe el algoritmo utilizado, *Greedy Forwarding*.

Por último se presentan los escenarios en los que se van a evaluar las prestaciones de las redes de sensores.

3.1. Entorno de trabajo

Como se ha expuesto con anterioridad, existen múltiples aplicaciones para las redes de sensores. Sin embargo, este proyecto Fin de Carrera pretende abordar el problema que se plantea en un escenario genérico, sin particularizar a ninguna aplicación en concreto.

Una fase importante en el diseño de una red de sensores es el despliegue de los mismos en la región de estudio. Para ello se parte del escenario de trabajo propuesto en [5], donde el campo de sensores escogido es una región cuadrada de $700 \times 700 \text{ m}^2$ y donde los nodos se disponen de forma aleatoria. La elección de la forma de la región así como el tipo de despliegue de los nodos está motivada por su simplicidad (e.g. un despliegue ordenado de los nodos, en malla, requiere un mayor esfuerzo humano), sin que los resultados obtenidos en el estudio pierdan generalidad. Se designa como nodo destino de la red (*sink*) aquel nodo situado más a la derecha en el campo de sensores (véase Figura 6).

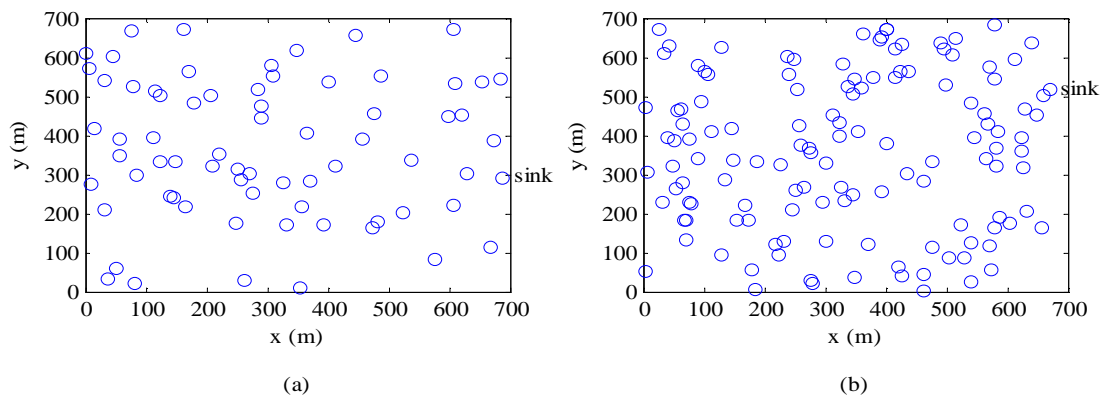


Figura 6.- Campo de sensores de 700x700 m², (a) con 70 nodos-sensores, (b) con 130 nodos-sensores.

Uno de los parámetros de diseño a analizar es la influencia de la variación de la densidad de la red para poder comprobar si las prestaciones de la red se ven alteradas cuando el valor de este parámetro se modifica. En este Proyecto Fin de Carrera se han considerado cinco valores diferentes de densidad de red, que se han resumido en la Tabla 1.

Nº de nodos totales	Nº de nodos por hm ²
70	1.43
85	1.73
100	2.04
115	2.35
130	2.65

Tabla 1. - Número de nodos-sensores de la red y su densidad por hm².

Se ha considerado que los nodos están desplegados a una altura de 1.5 metros [12]. La batería inicial de cada uno de los sensores es de 3000 unidades, a excepción del nodo destino que tiene batería ilimitada ya que es el encargado de hacer el procesamiento de la información recibida y, por tanto, no tiene restricciones. Dado que los procesos de comunicación son tareas que implican un gran consumo de energía en una red de sensores [22] se ha asociado un gasto energético a cada uno de los estados en los que puede encontrarse el sensor. En particular, para el estudio llevado a cabo en este Proyecto Fin de Carrera el coste energético asociado a la transmisión de un mensaje es constante y toma un valor de 2 unidades, 0.8 unidades si es una recepción, y también 0.8 unidades si el nodo se encuentra en estado *idle* (es decir, si el nodo está en escucha a la espera de que ocurra algún evento). Los resultados aquí obtenidos se podrían generalizar a escenarios donde el consumo de energía fuera variable y dependiese de factores como el tiempo que cada nodo está en cada estado o de las distancias entre sensores (e.g. transmitir a sensores que están físicamente más alejados implicaría un mayor consumo de energía).

El tiempo máximo de vida de la red viene determinado por el instante de tiempo en que el nodo destino se queda aislado, es decir, se desconecta de sus vecinos sin que

haya posibilidad de comunicarse con ellos, finalizando el funcionamiento de la red. Los mensajes generados se asignan aleatoriamente a un nodo-sensor, que se encarga de encaminarlos hacia el *sink*.

Otros parámetros fijos de la red son: la frecuencia de trabajo, que está fijada a 2,4 GHz (WIFI), y la longitud de onda λ es de 0.125 metros (propagación en el vacío) [12].

Una vez planteado el escenario de trabajo, en la siguiente sección se va a exponer cómo se van a incorporar y tener en cuenta las características radiantes de las antenas en la red de sensores.

3.2. Incorporación de las características radiantes de las antenas

Los parámetros definidos en la sección anterior se utilizan para la generación de las topologías que van a ser objeto de estudio. Como se ha indicado previamente, los nodos son desplegados aleatoriamente en el campo de sensores, creando así la topología física de la red de sensores. Debido a limitaciones de potencia, cada nodo únicamente puede comunicarse con aquellos nodos que estén dentro de su área de cobertura, que es modelado como un grafo de disco unitario (UDG). Cada nodo puede comunicarse con aquellos nodos que estén dentro de su radio de transmisión *delta*, que por simplicidad, es el mismo para todos los nodos sensores. Típicamente los nodos construyen sus tablas de vecinos durante una etapa inicial basándose en distancias físicas.

Sin embargo, para evaluar las prestaciones de las redes de sensores teniendo en cuenta la influencia de las características radiantes de los sensores es necesario incluir dicha información en la red. Para lograr tal fin, en este Proyecto Fin de Carrera se ha seguido el modelo basado en distancias equivalentes propuesto en [5], donde las topologías físicas se ven alteradas tanto por la eficiencia de las antenas transmisoras y receptoras de los nodos como por las derivas en el diagrama de radiación de las antenas.

Se calculan las distancias equivalentes [5] como:

$$d_{eq} = \begin{cases} \frac{d}{\sqrt{eff_r \cdot D_r} \cdot \sqrt{eff_t \cdot D_t}} & \text{para } d \leq d_{cross} \\ & \text{(Friis Model)} \\ \frac{d}{\sqrt[4]{eff_r \cdot D_r} \cdot \sqrt[4]{eff_t \cdot D_t}} & \text{para } d > d_{cross} \\ & \text{(Two Ray-Ground Model)} \end{cases} \quad (3.1)$$

siendo eff_r y eff_t las eficiencias de las antenas en recepción y transmisión y D_r y D_t las directividades de las antenas en recepción y transmisión, respectivamente. $d_{cross} = (4 \cdot \pi \cdot h_t \cdot h_r) / \lambda$, y d es la distancia física entre los nodos-sensores, y se calcula como la distancia euclídea:

$$d = \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2}, \quad (3.2)$$

donde (x_i, y_i) y (x_j, y_j) son las coordenadas cartesianas de la posición en el campo de sensores de los nodos i y j , respectivamente.

De esta forma, el uso de distancias equivalentes permite introducir características de las antenas en el diseño de las topologías de redes de sensores. Y en este caso, para establecer los enlaces de comunicación entre sensores no se tienen en cuenta las distancias físicas sino las equivalentes. Cada nodo evalúa si la distancia equivalente con respecto a los demás sensores de la red es inferior a su radio de cobertura (i.e., $d_{eq} < \delta$), en cuyo caso se establece el enlace, mientras que si es superior, el sensor queda desconectado de ese nodo. De esta forma, cada nodo construye la tabla de *nodos vecinos* con los que puede establecer comunicación.

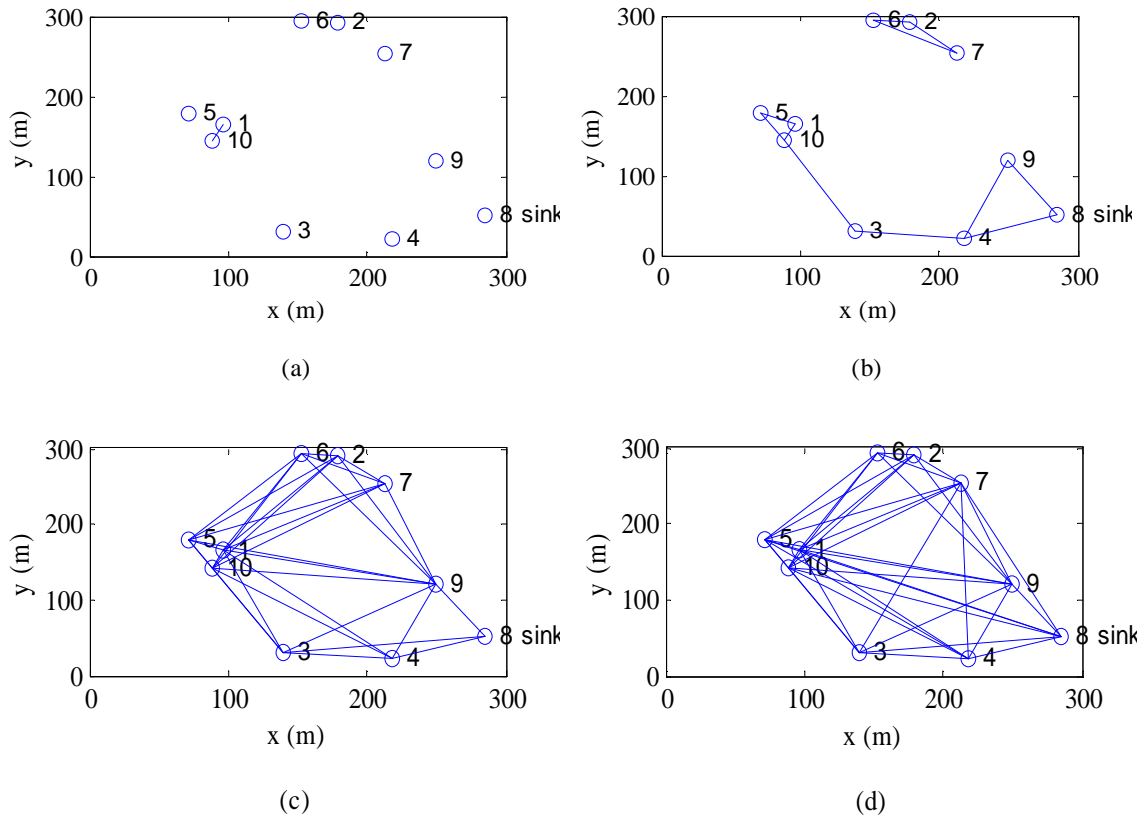


Figura 7.- Topología de red de sensores con antenas omnidireccionales (ideales), donde la eficiencia de las antenas en transmisión y recepción es del (a) 10%, (b) 50%, (c) 80% y (d) 100%. Red de 10 nodos en un campo de sensores de $300 \times 300 \text{ m}^2$.

De forma ilustrativa, en la Figura 7 se han desplegado diez sensores en un área de $300 \times 300 \text{ m}^2$ (nótese que la posición de los nodos es la misma en los cuatro escenarios, tienen la misma topología física). Los nodos sensores están dotados de antenas ideales, es decir, presentan un diagrama de radiación constante en todas las direcciones del espacio y de valor 1. El propósito de esta figura es analizar el efecto de la variación de las eficiencias de las antenas transmisora y receptora en la generación de

enlaces para la construcción de las tablas de vecinos. Tal y como se aprecia en la figura, a medida que disminuye la eficiencia de las antenas se va reduciendo el número de enlaces entre los nodos. Puede ocurrir que el *sink* esté aislado, no tenga establecidos enlaces con ningún otro nodo, estando la red desconectada, tal y como se observa en la Figura 7 (a). Para valores bajos de eficiencia en las antenas transmisora y receptora, la distancia equivalente entre nodos aumenta y por tanto, se establecen menos enlaces entre sensores porque los nodos se detectan como si estuvieran más alejados.

Por este motivo es interesante cuantificar la degradación sufrida en las prestaciones de la red de sensores cuando se tienen en cuenta las características de las antenas de los sensores (objetivo de este Proyecto Fin de Carrera) con el fin de establecer un umbral de eficiencia en las antenas que permita garantizar un funcionamiento óptimo de la red.

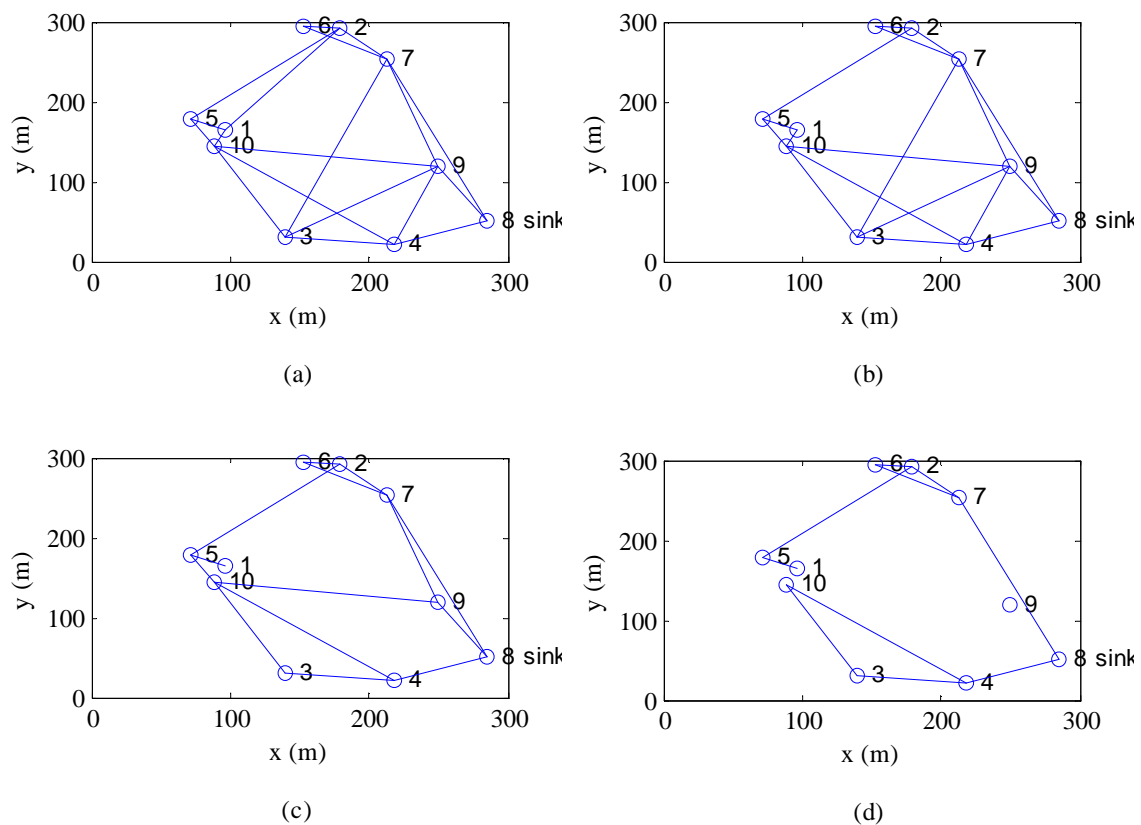


Figura 8.- Topología de red de sensores con antenas tipo dipolo, para diferentes longitudes: (a) 0.2λ , (b) 0.4λ , (c) 0.8λ y (d) λ . Las antenas tienen eficiencia del 100%. Red de 10 nodos en un campo de sensores de $300 \times 300 \text{ m}^2$.

Pero en la práctica, las antenas omnidireccionales no son viables. Por eso es necesario estudiar las prestaciones de las redes de sensores partiendo diagramas de radiación no constantes en todas las direcciones. Esto ha motivado el uso de diagramas de radiación más realistas, correspondientes a antenas tipo dipolo, donde el valor de la directividad varía según la dirección en la que se transmite/recibe. Estas derivas en el diagrama de radiación provocan, al igual que en el caso anterior, que se establezcan enlaces diferentes entre los sensores cuando se varía la longitud del dipolo, a pesar de que la topología física permanece invariable. Esto se refleja claramente en la Figura 8, donde se representan los enlaces entre sensores para diferentes diagramas de radiación correspondientes a antenas dipolo de distinta longitud.

Pero previamente, en la siguiente sección se describe el algoritmo de enrutamiento empleado para hacer llegar los mensajes al nodo destino.

3.3. Algoritmo de enrutamiento: *Greedy Forwarding*

Para dotar de funcionalidad a una red de sensores es necesario definir un protocolo de enrutamiento que permita encontrar la mejor ruta posible hacia el destino. Habitualmente, la comunicación entre el nodo fuente de la información y el nodo destino en una red de sensores inalámbricas requiere de múltiples saltos no sólo porque se consume menos energía que en comunicaciones de un solo salto, sino también debido a las limitaciones de potencia de los nodos sensores.

En la literatura se han definido una gran variedad de algoritmos de enrutamiento para redes *ad-hoc* tradicionales. Protocolos como vector Distancia o Estado de enlace, que requieren una actualización continua de la topología en todos los nodos, no son apropiados a las características de las redes de sensores [23]

Los avances en los sistemas *GPS* (*Global Positioning System*), que han permitido fabricar receptores más baratos y de bajo consumo, y en otros servicios de localización han posibilitado el desarrollo de protocolos de enrutamiento basados en la posición de los sensores. Uno de estos protocolos que utiliza la información geográfica de los nodos es *Greedy Forwarding* [23], que es el que ha utilizado en este Proyecto Fin de Carrera y que detallamos brevemente a continuación.

Los mensajes generados en los nodos incluyen, además de los datos, información sobre la localización del nodo destino, que conocido por todos los sensores de la red. Además, los nodos tienen información geográfica de la posición de algunos nodos de la red, llamados *vecinos*. Esta información es adquirida mediante un sencillo algoritmo de señalización, para dar a conocer su posición a sus vecinos. Cada nodo envía periódicamente un mensaje con su identificador y su posición (*beacon* o baliza) para indicar a los demás nodos que siguen activos y no han agotado baterías. Para evitar que haya sincronización en el envío de balizas con otros vecinos, cada nodo aleatoriza la transmisión de cada baliza un 50% sobre el valor del intervalo entre balizas.

Cuando un nodo sensor tiene un mensaje que transmitir selecciona de entre sus *vecinos* al nodo que le proporcione un mayor avance hacia el nodo destino, con la finalidad de minimizar el número de saltos. Un ejemplo de cómo funciona el algoritmo *Greedy Forwarding* se ilustra en la Figura 9. El nodo *x* recibe un mensaje destinado al

nodo D . El nodo x puede transmitir a cualquiera de sus vecinos incluidos en su radio de cobertura, denotado por el círculo de líneas punteadas centrado en x . El arco con radio igual a la distancia entre y y D (arco punteado sobre D) denota que el nodo y es el *vecino* con el que el nodo x tiene un mayor avance hacia D . Por tanto, el sensor x envía el mensaje al nodo y . El proceso se repite en el nodo y , busca el vecino que le proporcione mayor avance hacia el *sink*, hasta llegar el mensaje al nodo destino.

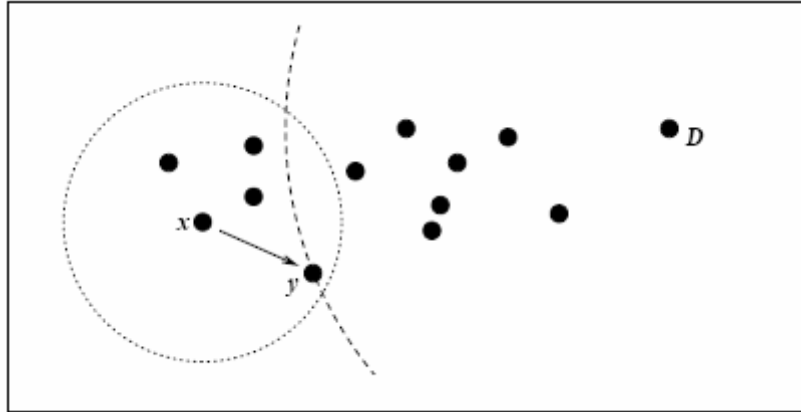


Figura 9.- Ejemplo de funcionamiento del algoritmo Greedy Forwarding. El nodo y es el de mayor avance hacia el destino, el nodo D , de los vecinos de x .

Sin embargo, puede suceder que el nodo que tiene que transmitir el mensaje no encuentre *vecinos* que le proporcionen avance hacia el nodo destino. Dicho de otra forma, no tiene ningún vecino entre su posición y la del *sink*. En este caso el mensaje se descarta. Un ejemplo que ilustra esta situación se muestra en la Figura 10. Aquí, el nodo x tiene por vecinos a los nodos w e y , pero ambos están más lejos del nodo destino D que el propio nodo x . Como x no tiene de *vecino* al nodo D y tanto w como y no le proporcionan avance hacia el destino, x deshecha el mensaje. Este es el principal inconveniente de este algoritmo de encaminamiento, sobre todo cuando la red es dispersa o tiene huecos, y por eso en la literatura han aparecido muchos otros algoritmos tratando de dar solución a este problema, como es el caso del algoritmo GPSR [23].

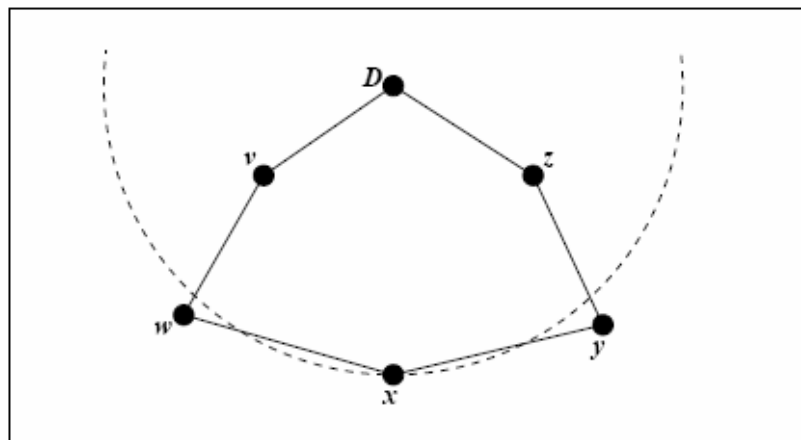


Figura 10.- Ejemplo en el que el Greedy Forwarding falla. El nodo x es un máximo local en las proximidades de D .

A pesar de que este algoritmo tiene el inconveniente indicado anteriormente, es el que se ha implementado en este trabajo, dada su simplicidad. No obstante, la elección de otro algoritmo de enrutamiento no afecta a los resultados cualitativos del estudio que se ha realizado (tal y como se observó en [5]).

Además, por simplicidad en las simulaciones realizadas se ha supuesto que los nodos conocen la posición tanto del nodo destino como de sus vecinos durante una etapa inicial. También se ha supuesto que el envío periódico de balizas no repercute significativamente en el consumo energético de los nodos, despreciándose por tanto. Tampoco se contempla el re-envío de mensajes en caso de no llegar al nodo destino.

3.4. Escenarios

En esta sección se describen los distintos escenarios y entornos de simulación utilizados, detallando aspectos como el diagrama de radiación de las antenas de los nodos, la orientación de las mismas en el espacio de dos y tres dimensiones, entre otros.

a. Primer escenario: antenas ideales

En este primer escenario, los elementos radiantes de los sensores tienen un diagrama de radiación isotrópico (constante en todas las direcciones y de valor normalizado a 1). En la Figura 11 se ilustra el diagrama de radiación normalizado generado por una antena ideal situada en el origen de coordenadas. Aquí la directividad de la antena en transmisión y en recepción toma un valor de 1, de modo que la distancia equivalente sólo se ve afectada por la eficiencia de la antena, como se deduce de (3.1). La finalidad de este escenario es tratar de analizar el efecto que tiene en las prestaciones de la red una variación en la eficiencia de los elementos radiantes de los sensores.

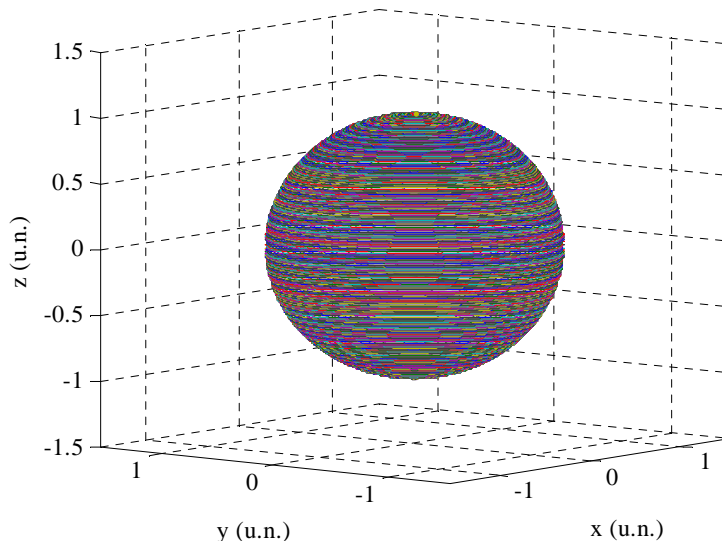


Figura 11.- Diagrama de radiación de una antena isotrópica (ideal), situada en el origen de coordenadas.

Es preciso destacar que, en este caso, la orientación de la antena en el espacio es un parámetro que no es necesario considerar, ya que el diagrama de radiación es constante en todas las direcciones (véase Figura 12).

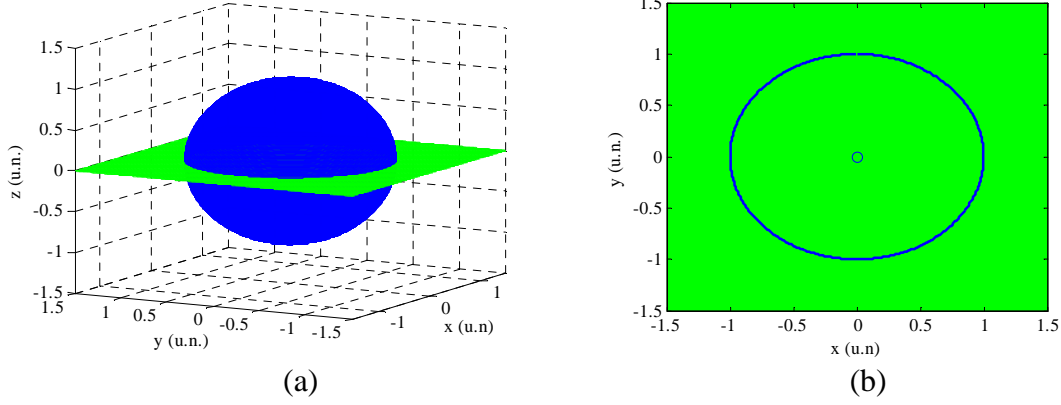


Figura 12.- (a) Diagrama de radiación de una antena ideal situada en el origen de coordenadas con corte en el plano xy (plano $z=0$) (b) Representación del diagrama de radiación en el plano xy.

Para todos los escenarios considerados, se parte de que la eficiencia de las antenas en transmisión y recepción es idéntica, es decir, se consideran todas las antenas iguales (incluida la del nodo destino) siendo, por tanto, una red de sensores homogénea.

b. Segundo escenario: antenas dipolo

En este segundo escenario, se dota a los sensores de una red con antenas tipo dipolo. En este caso, los diagramas de radiación no son omnidireccionales, es decir, tienen mayor directividad en unas direcciones del espacio que en otras, llegando a tener nulos de radiación en la dirección del eje del dipolo. Por eso es necesario caracterizar el dipolo que se va a utilizar en las simulaciones.

Se elige un dipolo de longitud finita (descrito en [14]). El diagrama de radiación para un dipolo de longitud l situado en el origen de coordenadas y orientado en la dirección del eje z viene dado por la siguiente expresión (3.3):

$$F(\theta, \phi) = F(\theta) = \left[\frac{\cos\left(\frac{k \cdot l}{2} \cdot \cos \theta\right) - \cos\left(\frac{k \cdot l}{2}\right)}{\sin \theta} \right]^2 \quad (3.3)$$

La representación de (3.3) se muestra en la Figura 13. Se aprecia claramente como el diagrama de radiación no es constante, ya que presenta nulos de radiación en la dirección del eje del dipolo. Tiene los máximos de radiación en el plano situado a 90° del eje del dipolo, y al ser función sólo de θ , presenta simetría de revolución en el eje z . Todo esto hace que la directividad no sea constante y varíe según la dirección en la que el nodo transmita o reciba. Por tanto, la orientación del dipolo es un factor que se tiene que tener en cuenta cuando se calculan las prestaciones de la red de sensores, ya que la directividad varía según la dirección en la que estén colocados los sensores. Por ejemplo, un dipolo situado en el origen de coordenadas orientado en la dirección del eje z , como se ha visto anteriormente, tiene un nulo de radiación en $\theta=0$, pero si se gira 90° y se coloca sobre el eje x , presenta un máximo de radiación para $\theta=0$.

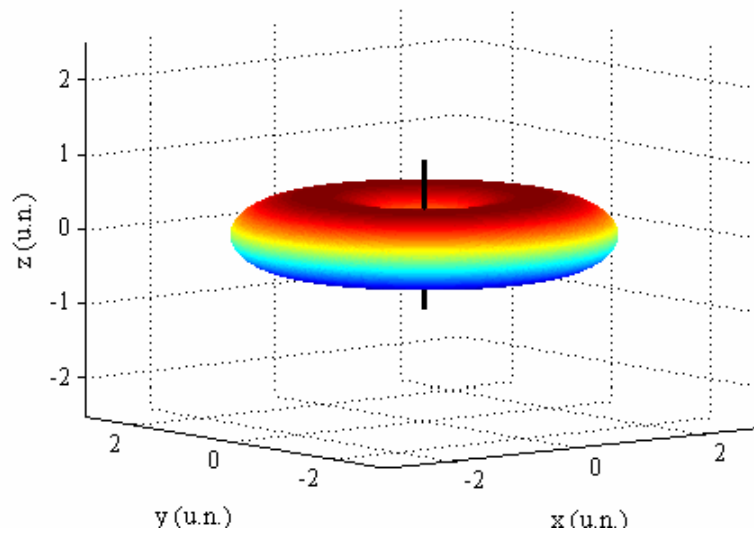


Figura 13.- Diagrama de radiación de un dipolo de longitud λ situado en el origen de coordenadas. El dipolo está colocado en la dirección del eje z .

Otro parámetro a considerar es la longitud del dipolo, que se expresa en función de la longitud de onda, λ . El diagrama de radiación varía con la longitud de la antena considerada, tal y como se observa en la Figura 14. En el estudio realizado se han considerado cinco longitudes de dipolo distintas: 0.2λ , 0.4λ , 0.6λ , 0.8λ y λ .

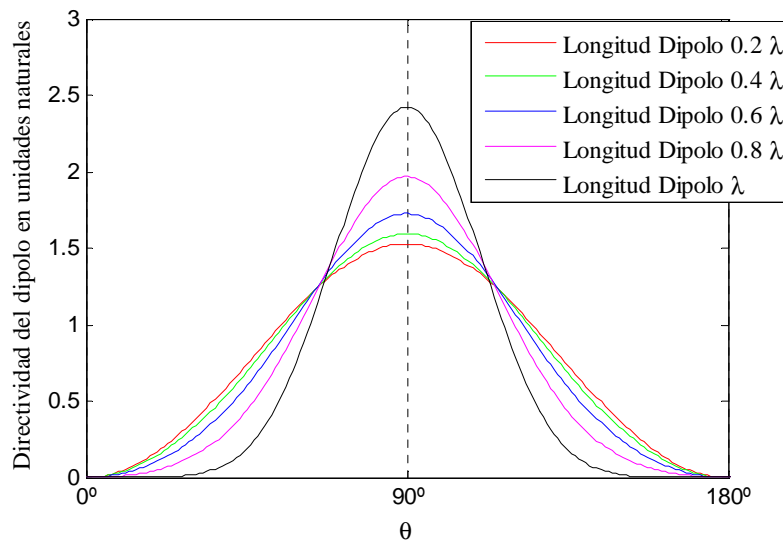


Figura 14.- Diagrama de radiación de una antena dipolo para distintas longitudes de dipolo.

Dentro de este escenario se van a analizar dos casos. En el primero de ellos, los dipolos se posicionan aleatoriamente en un plano (2 dimensiones), y en el segundo los dipolos se colocan aleatoriamente en el espacio (3 dimensiones).

Entorno de trabajo 2 dimensiones

Para este escenario, se utiliza el diagrama de radiación definido en (3.3) normalizado respecto a la directividad máxima, y que corresponde a una antena dipolo de longitud l situada en el origen de coordenadas y orientada en la dirección del *eje* z . En primer lugar, se va a detallar la colocación de los dipolos en el campo de sensores.

Los dipolos se orientan de forma aleatoria sobre el plano de referencia, *plano* xz . Nótese que en este plano el diagrama de radiación del dipolo sólo depende del ángulo θ , según la ecuación (3.3). En la Figura 15 se muestra el diagrama de radiación de un dipolo de longitud λ colocado en el origen de coordenadas y orientado en el *eje* z , y su diagrama de radiación en el *plano* xz .

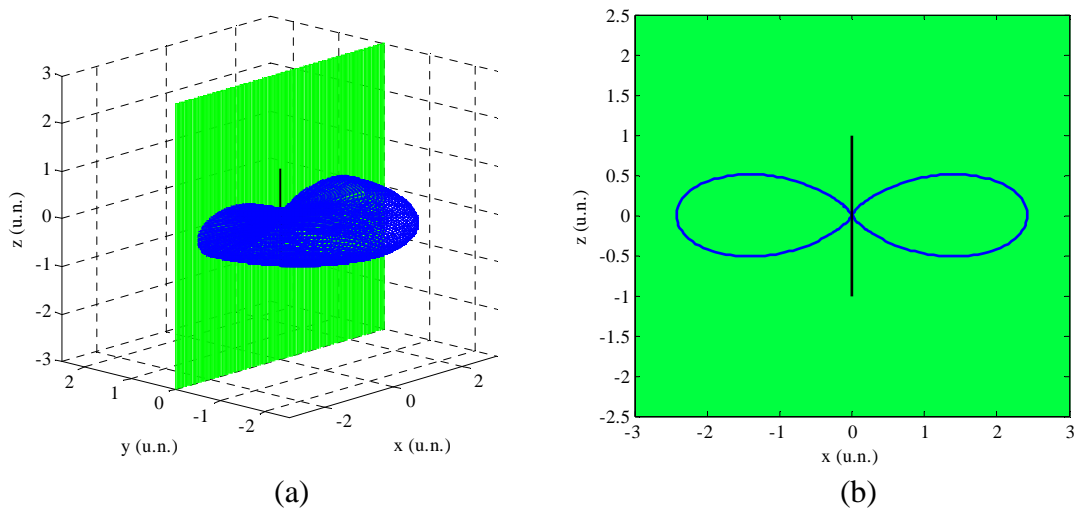


Figura 15.- (a) Representación en tres dimensiones del diagrama de radiación de un dipolo de longitud λ y el plano de referencia (en verde, plano xz), y (b) diagrama de radiación del dipolo en el plano xz .

A modo ilustrativo y para explicar de forma detallada el cálculo de la directividad que presentan los dipolos según su orientación, se considera un ejemplo sencillo de dos nodos situados en un campo de sensores de $12 \times 8 \text{ m}^2$. Al igual que antes, el despliegue de los nodos en el plano se efectúa de forma aleatoria, y se ilustra en la Figura 16, donde los dipolos tienen longitud λ . Se siguen tres pasos de manera sistemática en cada uno de los nodos de la red.

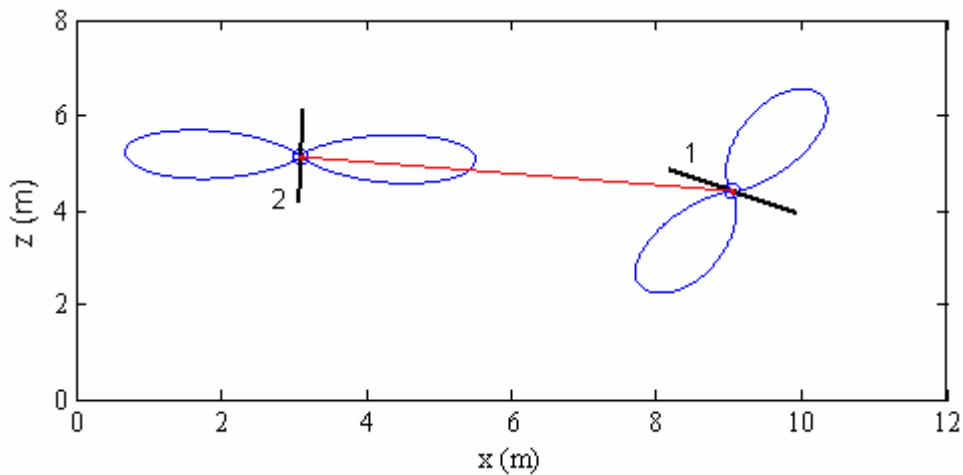


Figura 16.- Campo de sensores de $12 \times 8 \text{ m}^2$ con dos dipolos de longitud λ .

➤ *Paso uno: orientación de los dipolos en el plano xz.*

Se despliegan los dipolos, asignando a cada uno una dirección θ' en el plano xz. El ángulo θ' es una variable aleatoria uniforme entre 1 y 360, y se calcula desde la horizontal en sentido antihorario (véase Figura 17). En este ejemplo, el nodo 1 tiene asignado un dipolo orientado a 332° , y el sensor 2 lo tiene a 268° . La precisión es de un grado, es decir, se generan valores de θ' enteros entre 1 y 360.

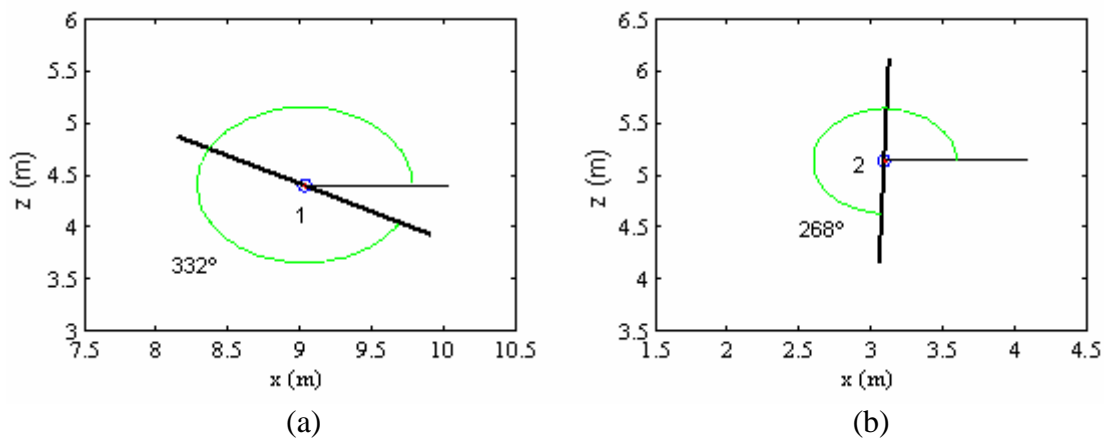


Figura 17.- (a) El dipolo 1 tiene una orientación de 332° , (b) el dipolo 2 está orientado a 268° .

➤ *Paso dos: cálculo del ángulo α .*

Cada nodo de la red crea una tabla donde almacena el ángulo α , que hace referencia al ángulo que forma el nodo i con cada uno de sus nodos vecinos j . Alfa tiene su origen en la horizontal y se mide en sentido antihorario. Para el cálculo del ángulo α se utiliza la recta que se forma al unir el nodo i con el nodo j . Haciendo uso del algoritmo que se muestra en la Figura 19, se obtiene una tabla con los valores del ángulo α , que para el ejemplo con dos nodos, se muestra en la Tabla 2, y se ilustra en la Figura 18.

	NODO 1	NODO 2
Nodo 1	-	173°
Nodo 2	353°	-

Tabla 2.- Valores del ángulo α para el ejemplo de dos sensores.

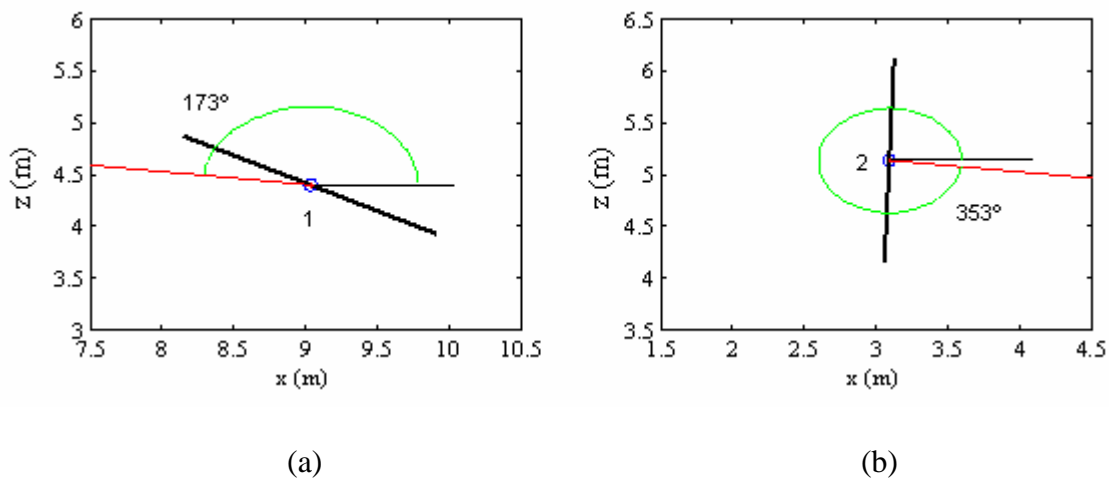


Figura 18.- (a) El dipolo 1 ve al dipolo 2 a 173°, (b) el dipolo 2 ve al dipolo 1 a 353°.

```

 $N \leftarrow N^{\circ} \text{ de nodos}$ 
para  $i \leftarrow 1$  hasta  $N$  hacer
  para  $j \leftarrow 1$  hasta  $N$  hacer
    si  $i \neq j$  entonces
      si  $x_i = x_j$  entonces
         $\alpha_{i,j} \leftarrow 0$ 
      si  $z_i > z_j$  entonces
         $\alpha_{i,j} \leftarrow \frac{\pi}{2}$ 
      fin si
      si  $z_i < z_j$  entonces
         $\alpha_{i,j} \leftarrow \frac{3\pi}{2}$ 
      fin si
    fin si
    si  $x_i \neq x_j$  entonces
       $\alpha_{i,j} \leftarrow \arctan \left( \frac{z_i - z_j}{x_i - x_j} \right)$ 
      si  $\alpha_{i,j} < 0$  entonces
         $\alpha_{i,j} \leftarrow \alpha_{i,j} + \pi$ 
      fin si
      si  $z_i > z_j$  entonces
         $\alpha_{i,j} \leftarrow \alpha_{i,j} + \pi$ 
      fin si
      si  $\alpha_{i,j} = 0$  y  $x_i > x_j$  entonces
         $\alpha_{i,j} \leftarrow \frac{\pi}{2}$ 
      fin si
    fin si
  fin para
fin para

```

Figura 19.- Pseudocódigo utilizado para calcular el ángulo α .

➤ Paso tres: ángulo θ'' y cálculo de la directividad.

Para calcular la directividad que tiene un nodo i de la red con respecto a otro nodo j , es preciso conocer la dirección a la que el dipolo i ve al nodo j . Tomando como referencia la orientación del dipolo impuesta por el ángulo α , se calcula el ángulo de visión del nodo i sobre el nodo j . Este ángulo, denotado como θ' , se mide en sentido antihorario y se calcula aplicando el algoritmo de la Figura 20.

```

 $N \leftarrow N^{\circ} \text{ de nodos}$ 
para  $i \leftarrow 1$  hasta  $N$  hacer
  para  $j \leftarrow 1$  hasta  $N$  hacer
    si  $i \neq j$  entonces
      si  $\theta_i' \geq \alpha_{i,j}$  entonces
         $\theta_{i,j}' \leftarrow 2\pi - (\theta_i' - \alpha_{i,j})$ 
      si no si  $\theta_i' < \alpha_{i,j}$  entonces
         $\theta_{i,j}' \leftarrow \alpha_{i,j} - \theta_i'$ 
      fin si
    fin si
  fin para
fin para

```

Figura 20.- Pseudocódigo utilizado para calcular el ángulo θ' .

Evaluando (3.3) para $\theta = \theta'$, se obtiene la directividad del dipolo i con respecto al nodo j . En la Figura 21 se ilustra el cálculo del ángulo θ' para el ejemplo de una red con dos sensores. Por último, se calcula la directividad para el ángulo θ' obtenido, tal y como se muestra en la Figura 22.

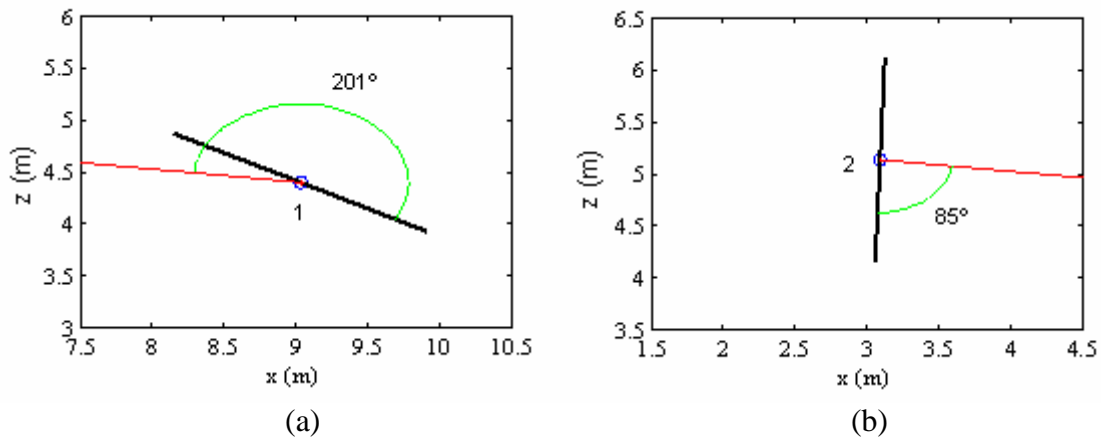


Figura 21.- (a) El dipolo 1 ve al nodo 2 a 201° , (b) el dipolo 2 ve al nodo 1 a 85° .

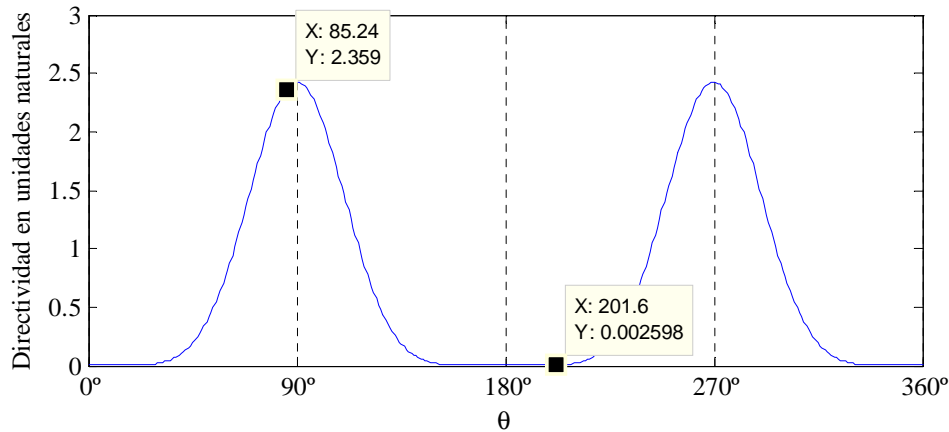


Figura 22.- Diagrama de radiación de un dipolo de longitud λ . Valores de los parámetros $\theta = 201^\circ$ y $\theta = 85^\circ$, con los respectivos valores de directividad de 0.002 y 2.359 en u.n.

Conocida la directividad de las antenas, ya se tienen todos los parámetros para generar las topologías. Al igual que en el escenario de antenas ideales, se utiliza el modelo de distancias equivalentes definido en (3.1) para establecer los enlaces de comunicación entre sensores.

Entorno de trabajo 3 dimensiones

En esta sección se va a generalizar el escenario anterior. En lugar de considerar el dipolo colocado en una superficie, ahora se va a mover libremente en el espacio de tres dimensiones. Por tanto, también es necesario calcular la directividad que tiene el dipolo i con el resto de nodos j de la red.

Al girar el dipolo libremente en el espacio, el diagrama de radiación pasa ahora a ser función tanto de θ como de Φ (coordenadas esféricas). Para ello, se va a hacer uso de la ecuación (3.4) y se referencia el diagrama de radiación del dipolo orientado en una dirección aleatoria del espacio mediante las coordenadas x, y, z del sistema de referencia. Nótese que el campo de sensores se considera en el plano xy , donde $z=0$. La Figura 23 y Figura 24 muestran algunos ejemplos de dipolos situados en distintas posiciones, y su diagrama de radiación en el plano xy .

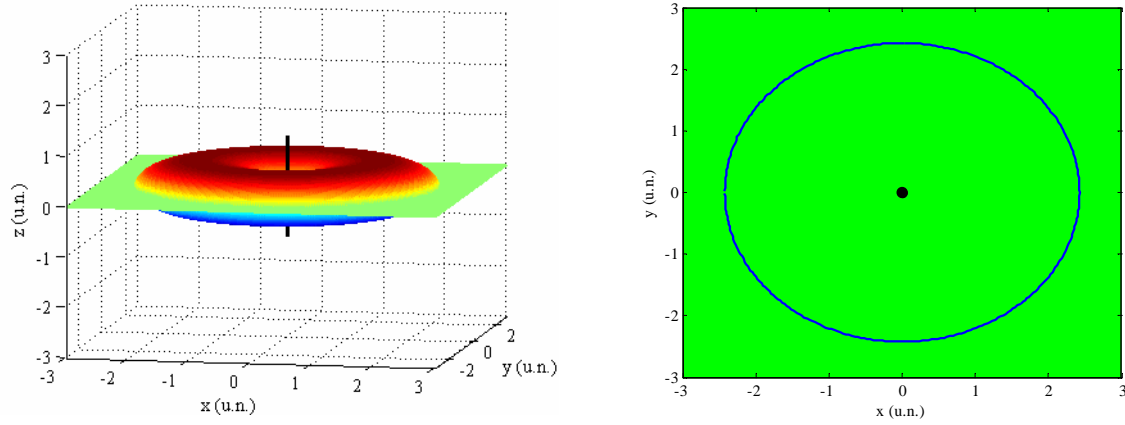


Figura 23.- Dipolo en el origen de coordenadas orientado en el eje z ($\theta=0^\circ$).

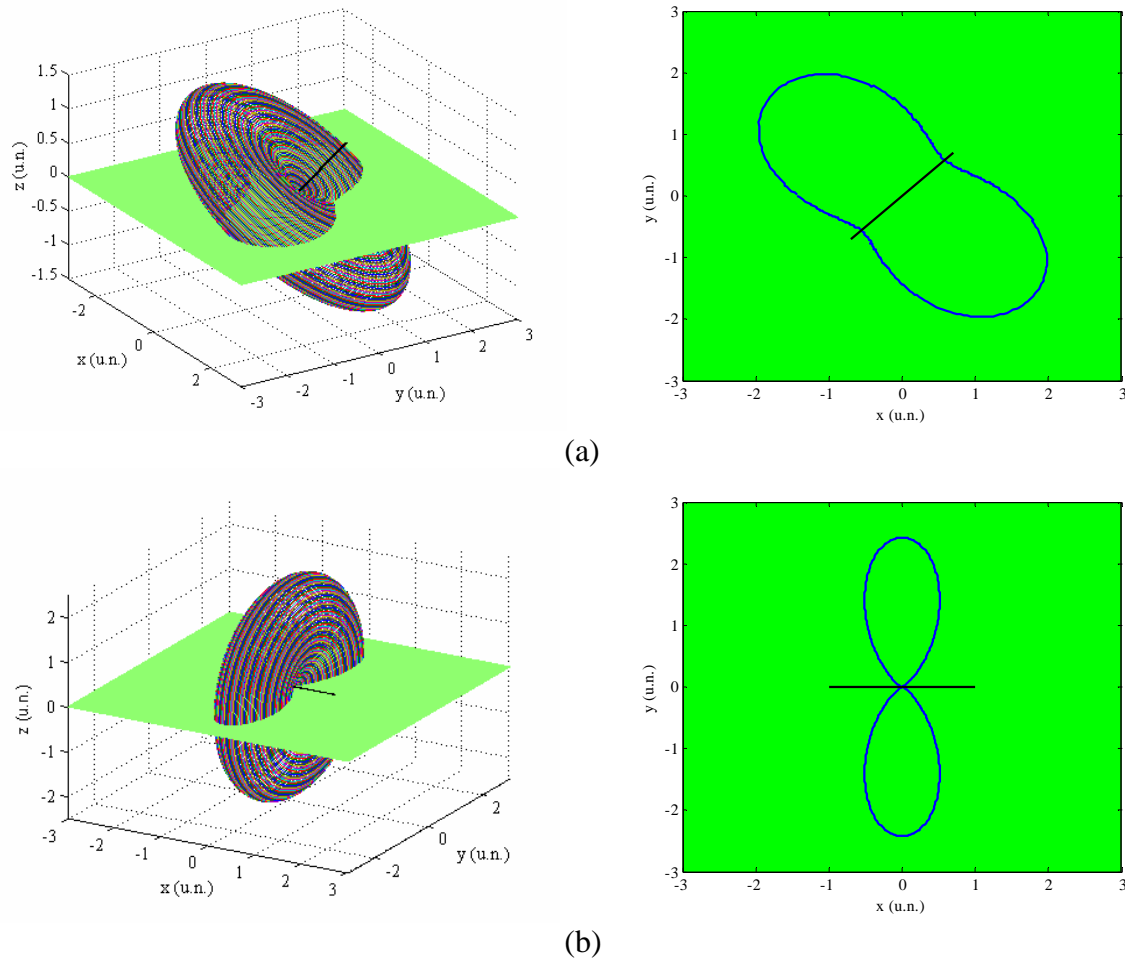


Figura 24.- (a) Dipolo situado en el origen de coordenadas y orientado en $\theta=150^\circ$ y $\Phi=45^\circ$. (b) Dipolo situado en el origen de coordenadas y orientado en el eje x ($\theta=90^\circ$ y $\Phi=0^\circ$).

Como se ha visto en los ejemplos anteriores, el diagrama de radiación ahora varía de forma según el ángulo θ' en el que está orientado el dipolo. Por su parte, el ángulo Φ' gira el diagrama de radiación en el *plano xy*. La definición de los ángulos θ' y

Φ' se explica a continuación. Al igual que en el apartado anterior, se siguen tres pasos para el cálculo de la directividad.

➤ *Paso uno: orientación de los dipolos en el espacio.*

Los dipolos se disponen aleatoriamente en el campo de sensores y se les asigna una dirección en el espacio definida por un ángulo θ' , aleatorio entre 0 y π , y un ángulo Φ' , aleatorio entre 0 y 2π (véase Figura 25), donde la precisión de ambos es de un grado. Nótese que por tener simetría de revolución, el diagrama de radiación en el eje z ($\theta=0$ ó $\theta=\pi$) utiliza una variable aleatoria para generar el ángulo θ' y otra para el ángulo Φ' , y en caso de que θ' sea 0 ó π , existen 360 sucesos iguales, por lo que unos sucesos son más probables que otros. Para evitar esto, se generan tres variables aleatorias uniformes entre 0 y 1, correspondientes a las coordenadas x, y, z . Y aplicando un cambio de coordenadas cartesianas a esféricas (3.4) se obtienen los ángulos θ' y Φ' que marcan la dirección del dipolo en el espacio.

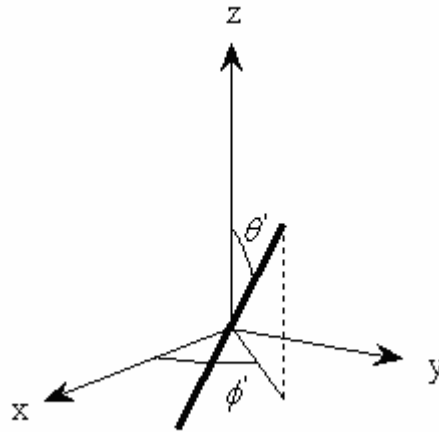


Figura 25.- Dipolo en el espacio de tres dimensiones, orientado según θ' y Φ' .

$$\theta' = \arctan\left(\frac{\sqrt{x^2 + y^2}}{z}\right) \quad \text{si } z = 0 \rightarrow \theta' = \frac{\pi}{2}$$

$$\phi' = \arctan\left(\frac{y}{x}\right) \quad \text{si } x = 0 \rightarrow \begin{cases} \text{si } y > 0 \rightarrow \theta' = \frac{\pi}{2} \\ \text{si } y < 0 \rightarrow \theta' = \frac{3\pi}{2} \end{cases} \quad (3.4)$$

➤ *Paso dos: cálculo de las coordenadas X,Y,Z del diagrama de radiación orientado según θ' y Φ' .*

Se parte del diagrama de radiación obtenido en (3.3), que está calculado para un dipolo sobre el eje z , y que como se ha visto, únicamente depende de θ . A continuación, se pasa de coordenadas esféricas a coordenadas rectangulares haciendo uso de (3.5).

$$\begin{aligned}
 x &= F(\theta) \cdot \sin(\theta) \cdot \cos(\phi) \\
 y &= F(\theta) \cdot \sin(\theta) \cdot \sin(\phi) \\
 z &= F(\theta) \cdot \cos(\theta)
 \end{aligned}
 \tag{3.5}$$

donde $0 \leq \theta \leq \pi$; $0 \leq \phi \leq 2\pi$ y $F(\theta)$ es el diagrama de radiación del dipolo dado por (3.3). Se gira el diagrama de radiación el ángulo θ' y el ángulo Φ' calculados en el paso uno. Este proceso se realiza en dos pasos. Primero se gira el dipolo en el *plano* xz un ángulo θ' ,

$$\begin{aligned}
 x' &= x \cdot \cos(\theta') - z \cdot \sin(\theta') \\
 Z &= x \cdot \sin(\theta') + z \cdot \cos(\theta')
 \end{aligned}
 \tag{3.6}$$

y después se gira en el *plano* xy los grados que marque Φ' .

$$\begin{aligned}
 X &= x' \cdot \cos(\phi') - y' \cdot \sin(\phi') \\
 Y &= x' \cdot \sin(\phi') + y' \cdot \cos(\phi')
 \end{aligned}
 \tag{3.7}$$

Las coordenadas X, Y, Z resultantes son las coordenadas del diagrama de radiación orientado según θ' y Φ' . Para ilustrarlo, se utiliza un ejemplo sencillo con dos dipolos situados en un campo de sensores de $12 \times 12 \text{ m}^2$. El dipolo 1 está orientado en la dirección $\theta' = 48.5^\circ$ y $\Phi' = 18.5^\circ$ y el dipolo 2 está colocado según $\theta' = 4.3^\circ$ y $\Phi' = 218.7^\circ$. La Figura 26 muestra los dipolos (de longitud de λ) en el campo de sensores con su diagrama de radiación en el *plano* xy .

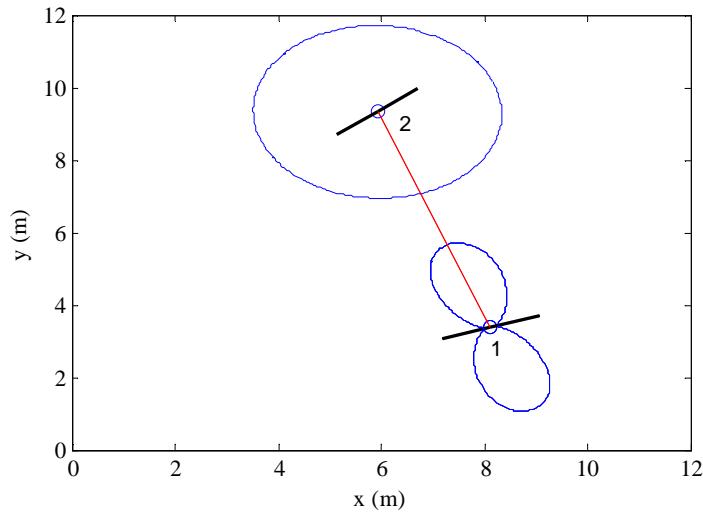


Figura 26.- Campo de sensores de $12 \times 12 \text{ m}^2$ con dos dipolos orientados en el espacio.

➤ Paso tres: cálculo de la directividad y ángulo α .

Conocidas las coordenadas X, Y, Z del diagrama de radiación del dipolo de longitud l orientado según θ' y Φ' , se calcula la intersección con el *plano* xy , que

se corresponde con el campo de sensores. Hay que destacar que todos los nodos se sitúan a la misma altura.

También es necesario referenciar el diagrama en coordenadas esféricas. Aplicando (3.4) a las coordenadas X, Y, Z , se obtienen los ángulos θ_d y ϕ_d , donde

$$F(\theta_d, \phi_d) = \sqrt{X^2 + Y^2 + Z^2} \quad (3.8)$$

siendo $F(\theta_d, \phi_d)$ el módulo del diagrama de radiación en coordenadas esféricas, que ahora depende de θ_d y ϕ_d . Para obtener la intersección con el *plano xy*, (en este plano $\theta_d = \frac{\pi}{2}$), se seleccionan los valores de $F(\theta_d, \phi_d)$ para $\theta_d = \frac{\pi}{2}$, obteniendo una $F'(\phi_d)$ que sólo depende de ϕ_d ($0 \leq \phi_d \leq 2\pi$).

Conocido $F'(\phi_d)$, la directividad del dipolo i con el nodo j se calcula a partir del ángulo α definido en la sección anterior. En este caso, α se corresponde con la coordenada ϕ_d , ya que el diagrama de radiación está calculado desde $\phi_d = 0$ hasta $\phi_d = 2\pi$. Por tanto, evaluando $F'(\phi_d)$ en el ángulo α se obtiene el valor de directividad. En la Figura 27 y Figura 28 se muestra el valor del ángulo α y el correspondiente valor de directividad para el ejemplo de dos nodos.

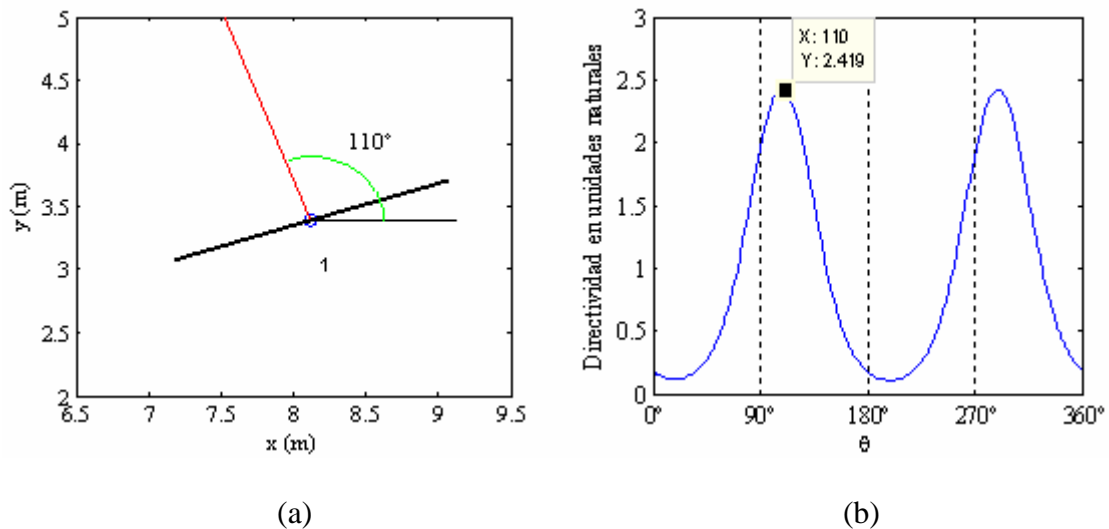


Figura 27.- (a) El dipolo 1 ve al nodo 2 a 110° . (b) Representación del diagrama de radiación del dipolo 1 en función de ϕ_d . En $\phi_d = 110^\circ$ el valor de directividad es 2.419 u.n.

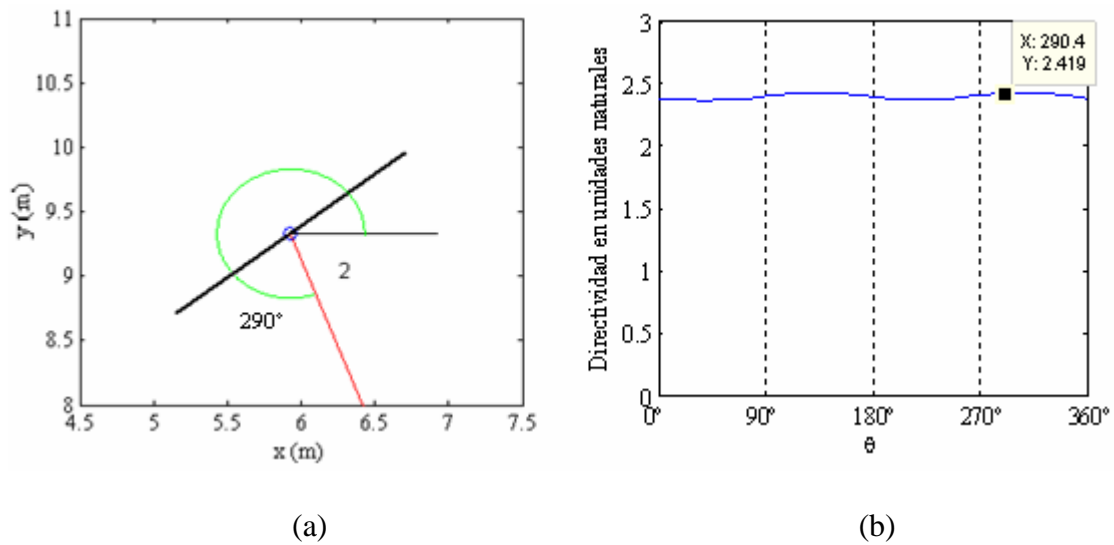


Figura 28.- (a) El dipolo 2 ve al nodo 1 a 290° . (b) Representación del diagrama de radiación del dipolo 2 en función de ϕ_d . En $\phi_d = 290^\circ$ el valor de directividad es 2.419 u.n.

Obsérvese que en ambos casos los máximos en el diagrama de radiación se mantienen a 90° del eje del dipolo, así como los nulos de radiación en la dirección del eje del dipolo.

Con los dipolos colocados aleatoriamente en el espacio y calculados los diagramas de radiación en el *plano xy*, se asignan los enlaces de comunicación según el método de distancias equivalentes (3.3).

c. Tercer escenario: antenas reales

En este escenario los diagramas de radiación de los nodos se corresponden con los medidos en antenas reales. En concreto, se simulan dos escenarios: en el primero se equipa a todos los nodos con la antena definida en [24], en adelante *antena real 1*. En el segundo escenario la antena utilizada se detalla en [4] y se denomina *antena real 2*.

La *antena real 1* corresponde a un producto comercializado por *antenova* bajo el nombre *Antena Mica 2.4 GHz SMD*. Entre otra información, se especifican la frecuencia de trabajo de 2.4-2.5 GHz, impedancia de 50 Ohm y eficiencia del 70% al 79%. Está diseñada para aplicaciones a 2,4 GHz como Bluetooth, WiFi (802.11 g/b), Zibee, WiMedia, entre otras.

La *antena real 2* se corresponde con el diseño de una antena cónica semiplana con patrón de radiación omnidireccional útil en aplicaciones de comunicaciones *ultrawideband* y radar en redes de sensores. La antena diseñada es ligera, de bajo coste, mecánicamente robusta, fácil de fabricar e integrar y reconfigurable.

La Figura 29 muestra los diagramas de radiación medidos en las antenas. En ambos casos, el diagrama de radiación se tabula de cinco en cinco grados, obteniendo para cada múltiplo de cinco grados el correspondiente valor de directividad (Ver Tabla 3 y Tabla 4). Para el primer escenario (Figura 29(a)) se utiliza el diagrama de radiación

medido a frecuencia 2.4 GHz. Para el segundo escenario (Figura 29(b)) se tabula el diagrama de radiación de trazo continuo, que está medido a una frecuencia de trabajo de 2 GHz.

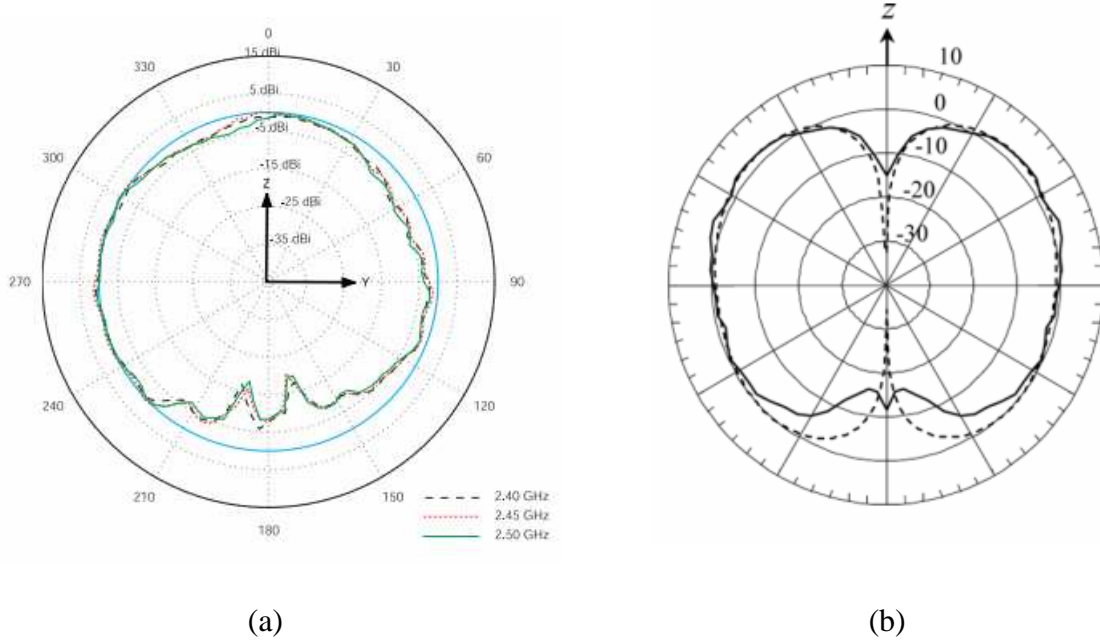


Figura 29.- (a) Diagrama de radiación de la antena definida en [24]. (b) Diagrama de radiación de la antena definida en [4].

Grados	Valor Directividad	Grados	Valor Directividad	Grados	Valor Directividad	Grados	Valor Directividad
0°	-1.38	90°	-2.76	180°	-7.59	270°	0.5175
5°	-1.035	95°	-2.415	185°	-5.6925	275°	0
10°	-1.035	100°	-2.9325	190°	-10.695	280°	0
15°	-1.38	105°	-2.76	195°	-16.905	285°	0
20°	-1.75	110°	-1.8975	200°	-7.245	290°	0.1725
25°	-1.8975	115°	-2.07	205°	-4.485	295°	-1.035
30°	-2.07	120°	-3.6225	210°	-4.83	300°	-1.2075
35°	-3.105	125°	-4.3125	215°	-6.21	305°	-0.5175
40°	-3.45	130°	-5.175	220°	-4.485	310°	-1.035
45°	-3.45	135°	-4.83	225°	-1.035	315°	-2.2425
50°	-4.3125	140°	-6.555	230°	-0.5175	320°	-3.2775
55°	-6.0375	145°	-8.625	235°	-1.38	325°	-2.9325
60°	-5.52	150°	-8.28	240°	-1.035	330°	-3.45
65°	-4.485	155°	-8.28	245°	0.1725	335°	-3.105
70°	-5.865	160°	-11.385	250°	0	340°	-3.105
75°	-4.83	165°	-17.25	255°	0	345°	-2.415
80°	-3.795	170°	-14.835	260°	0.345	350°	-1.8975
85°	-3.9675	175°	-9.66	265°	0.8625	355°	-1.38

Tabla 3.- Valores de directividad en dB de la antena real definida en [24].

Grados	Valor Directividad	Grados	Valor Directividad	Grados	Valor Directividad	Grados	Valor Directividad
0°	-22.7586	90°	1.4286	180°	-11.905	270°	0
5°	-4.762	95°	-1.1905	185°	-15.0003	275°	0.4762
10°	-6.1906	100°	-1.1905	190°	-18.5718	280°	1.4286
15°	-3.3334	105°	-1.9048	195°	-13.8098	285°	1.6667
20°	-1.4286	110°	-0.7143	200°	-12.8574	290°	1.6667
25°	-0.7143	115°	0	205°	-8.8097	295°	1.4286
30°	0	120°	-0.4762	210°	-5.7144	300°	1.1905
35°	1.4286	125°	-1.4286	215°	-4.2858	305°	1.9048
40°	1.6667	130°	-1.4286	220°	-3.8096	310°	2.381
45°	1.9048	135°	-2.3810	225°	-2.3810	315°	1.9048
50°	2.3810	140°	-3.8096	230°	-1.1905	320°	1.9048
55°	1.9048	145°	-4.2858	235°	-0.9524	325°	1.4286
60°	1.4286	150°	-5.9525	240°	-0.4762	330°	0.4762
65°	1.4286	155°	-8.0954	245°	-0.2381	335°	-0.4762
70°	2.3810	160°	-12.1431	250°	-0.9524	340°	-1.4286
75°	1.4286	165°	-13.8098	255°	-1.9048	345°	-3.3334
80°	1.1905	170°	-16.4289	260°	-0.4762	350°	-7.6192
85°	1.4286	175°	-15.4765	265°	-0.2381	355°	-16.1908

Tabla 4.- Valores de directividad en dB de la antena real definida en [4].

El cálculo de la directividad del *nodo i* con respecto al *nodo j* se calcula siguiendo los pasos descritos en el **segundo escenario: antenas dipolo** en el **entorno de trabajo 2 dimensiones**. El ángulo ϕ_d resultante se aproxima al ángulo más próximo de la Tabla 3 o Tabla 4, según corresponda en cada caso, obteniéndose así el valor de la directividad en dB.

Capítulo 4

Resultados

En este capítulo se van a evaluar y analizar los resultados obtenidos en el estudio del impacto que tiene sobre las redes de sensores el hecho de utilizar distintos tipos de antenas en diferentes escenarios. El objetivo es cuantificar el número de mensajes recibidos en el nodo destino, *sink*, durante el tiempo de vida de la red.

4.1. Resultados de las simulaciones

Una vez descrito en el capítulo anterior el entorno de trabajo (generación de la topología de red así como sus enlaces de comunicaciones y algoritmos de encaminamiento) y los escenarios, en esta sección se presentan y analizan los resultados obtenidos en las simulaciones para diferentes tipos de antenas, densidad de nodos de la red de sensores, y el radio de cobertura de los nodos. Los resultados están promediados sobre cincuenta topologías de red donde los nodos están desplegados aleatoriamente, para cada uno de los escenarios de simulación propuestos.

a. Primer escenario: antenas ideales

El objetivo del estudio es analizar las prestaciones de la red (medidas como el número de mensajes recibidos en el nodo destino durante el tiempo de vida de la red) cuando se varían diferentes parámetros de diseño. El primero de ellos es la variación del valor de la eficiencia de las antenas. Se generan topologías de redes de sensores donde el valor más bajo de eficiencia de las antenas es del 10%, incrementándose progresivamente un 5% hasta alcanzar el 100% de eficiencia.

Como ya se ha mencionado, otro parámetro de diseño es el número de nodos que se despliegan en el campo de sensores, es decir, la densidad de red. Se han generado topologías donde el número de sensores es diferente (de acuerdo a los valores de la Tabla 1 del Capítulo 3).

Por último, también se quiere analizar cuáles son las prestaciones de la red cuando el radio de cobertura de los sensores varía. En concreto, el estudio se va a hacer para tres valores diferentes: 150 m, 250 m y 300 m.

A continuación se presentan los resultados obtenidos en las diferentes simulaciones realizadas al variar los parámetros anteriores. En primer lugar se generan topologías de red donde el radio de cobertura de los nodos es de 150 m, variando los otros dos parámetros.

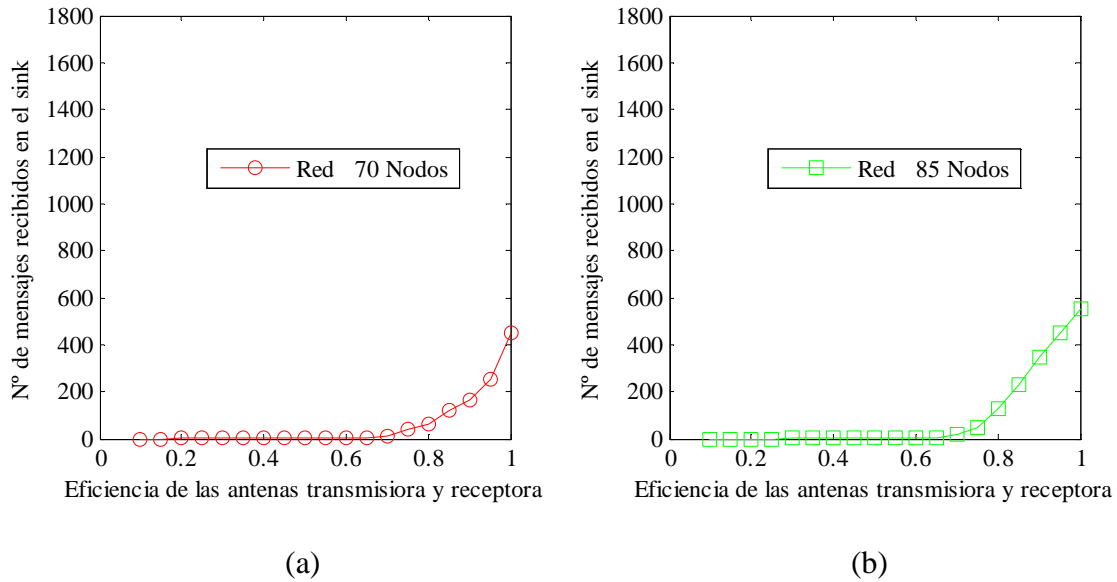


Figura 30. - Número de mensajes recibidos en el sink cuando varía la eficiencia de las antenas en una red con (a) 70 nodos, (b) 85 nodos. El radio de cobertura de los sensores es 150 m.

La Figura 30 y Figura 31 muestran el número de mensajes recibidos en el nodo destino en función de la eficiencia de las antenas para las distintas densidades de red consideradas. Una primera observación común a las dos figuras es que al aumentar la eficiencia de las antenas, las prestaciones del sistema mejoran, es decir, se reciben más mensajes en destino. Además, se puede establecer un umbral en la eficiencia por debajo del cual el número de mensajes recibidos es muy bajo, degenerando notablemente el rendimiento de la red de sensores (en todos los casos el valor del umbral de eficiencia mínimo es superior al 60%, para el radio de cobertura considerado).

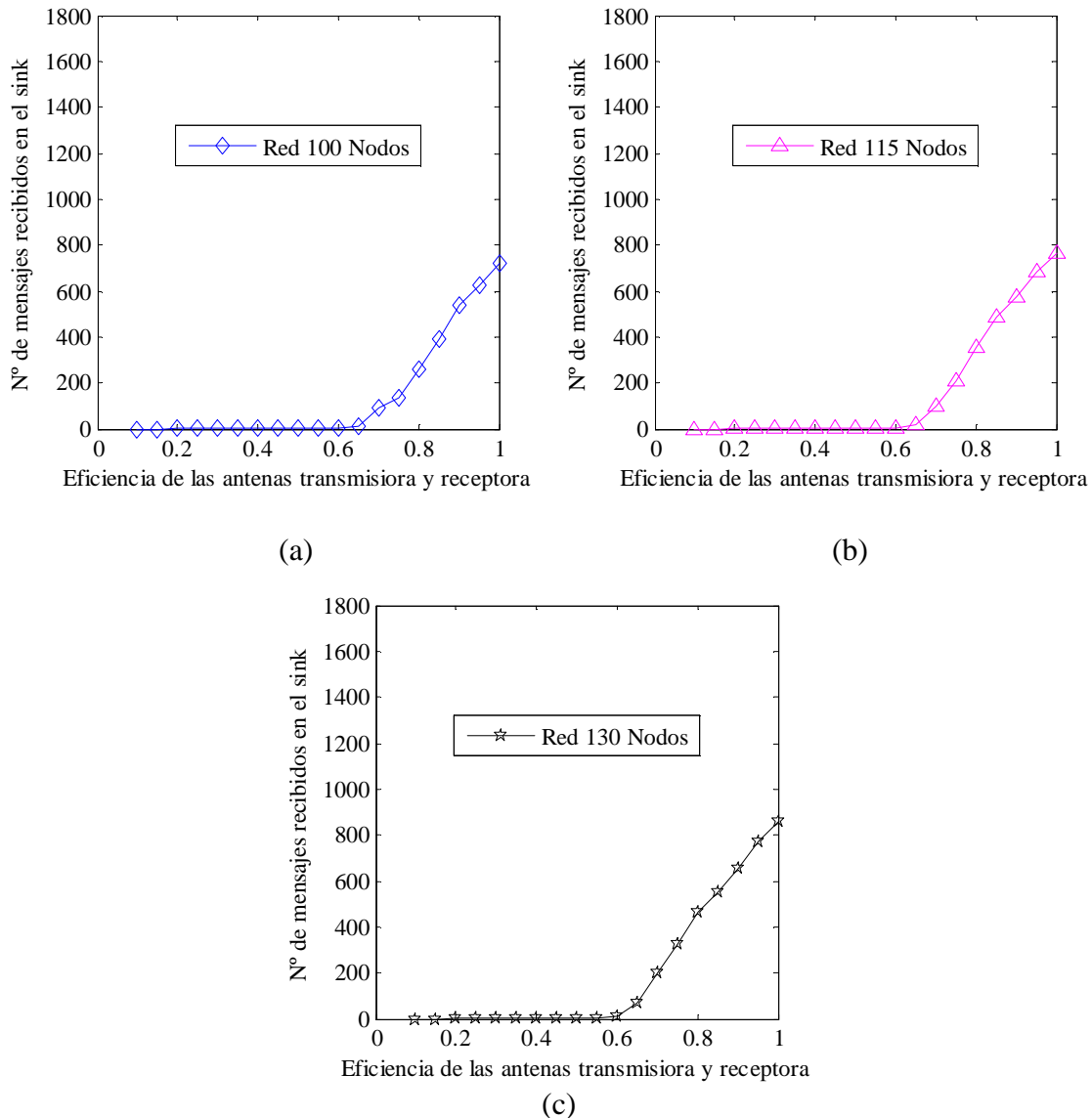


Figura 31.- Número de mensajes recibidos en el sink cuando varía la eficiencia de las antenas en una red con (a) 100 nodos, (b) 115 nodos, y (c) 130 nodos. El radio de cobertura de los sensores es 150 m.

Analizado el efecto de la variación de la eficiencia de las antenas, se va a comparar las prestaciones de las redes cuando cambia la densidad de la misma (véase Figura 32). Como cabe esperar, cuanto mayor es el número de nodos desplegados en la red de sensores, mejores son sus prestaciones, lo que se traduce en un número mayor de mensajes recibidos en el *sink*. Esto se debe a que al aumentar la densidad de la red los nodos se encuentran físicamente más cerca, siendo más probable enlaces entre los nodos que hacen que la red de sensores esté mejor comunicada. Aún así, y tal como se ha remarcado anteriormente, es necesario tener valores de eficacia en las antenas altos, estableciéndose un umbral en torno al 60 %. Por debajo de este valor las prestaciones del sistema degeneran significativamente.

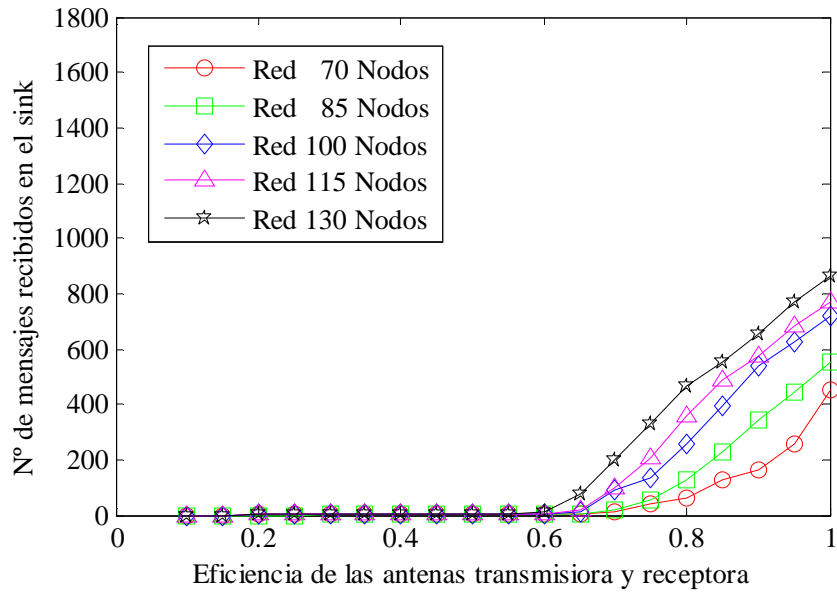


Figura 32.- Comparativa para distintas densidades de red del número de mensajes recibidos en el nodo destino cuando varía la eficiencia de las antenas (ideales). El radio de cobertura de los sensores es 150 m.

Una vez analizado el efecto de variar la eficiencia de las antenas y la densidad de nodos en redes de sensores donde el radio de cobertura es de 150 m, se va a analizar las prestaciones cuando el radio de cobertura aumenta a 250 m.

En primer lugar se analiza únicamente el efecto de variar la eficiencia de las antenas transmisora y receptora. Esto está ilustrado es la Figura 33 y Figura 34.

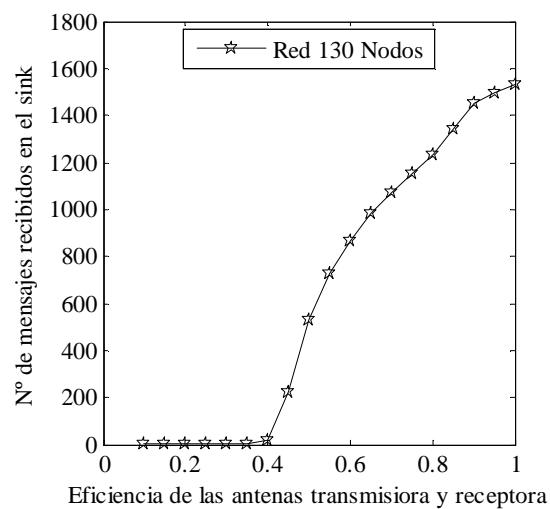


Figura 33.- Número de mensajes recibidos en el sink cuando varía la eficiencia de las antenas en una red con 130 nodos. El radio de cobertura de los sensores es 250 m.

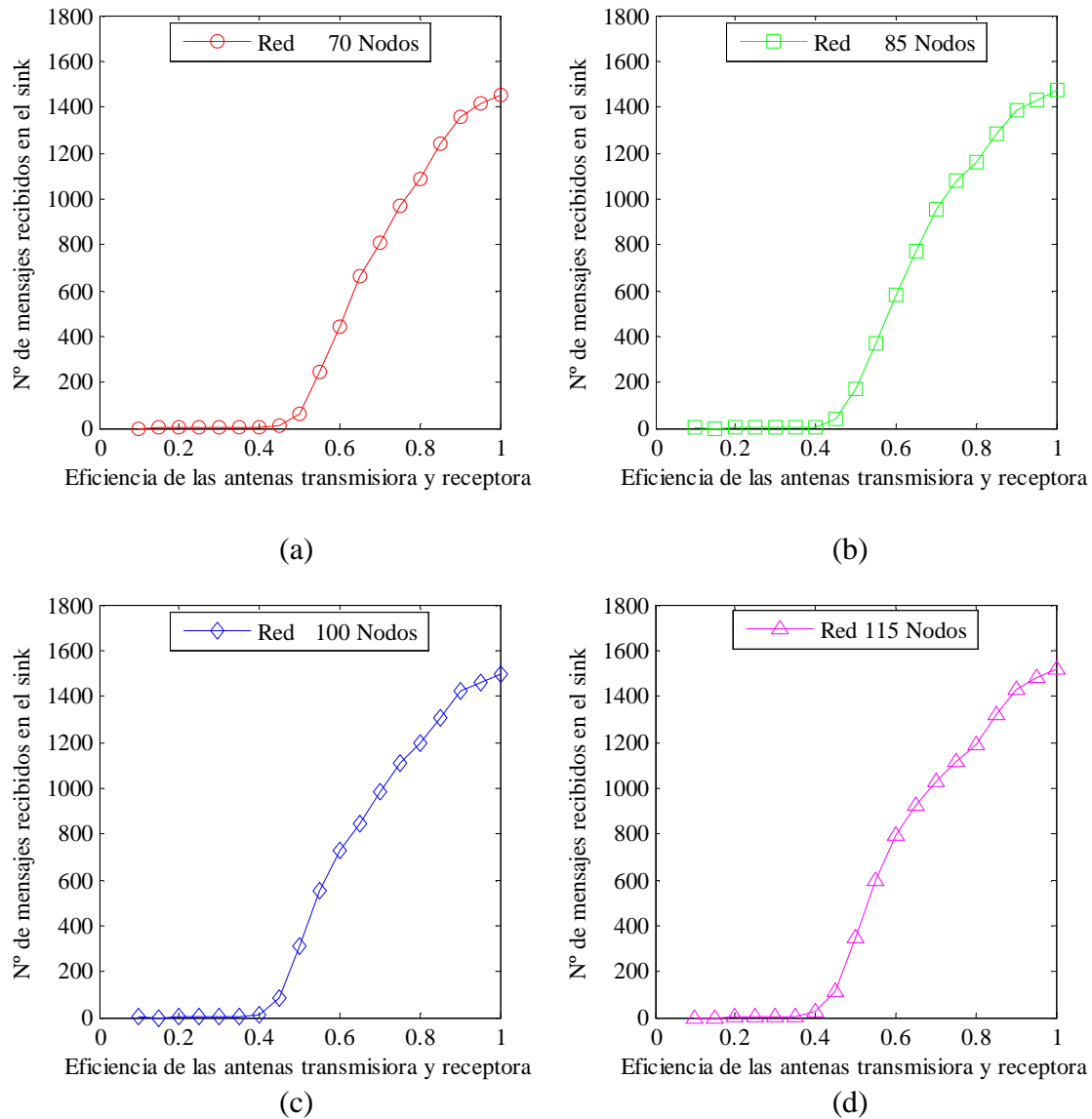


Figura 34.- Número de mensajes recibidos en el sink cuando varía la eficiencia de las antenas en una red con (a) 70 nodos, (b) 85 nodos, (c) 100 nodos, y (d) 115 nodos. El radio de cobertura de los sensores es 250 m.

Al igual que ocurría para el escenario donde el radio de cobertura era menor, se aprecia claramente que al aumentar la eficiencia de las antenas aumenta el número de mensajes recibidos en el nodo destino. Por tanto, las prestaciones del sistema mejoran cuando aumenta la eficiencia de la antena. Además, al aumentar el radio de cobertura de los sensores el umbral de eficiencia para el cual el rendimiento de la red se hace aceptable se desplaza hacia valores más bajos de eficiencia. En este caso, el umbral de eficiencia se sitúa en torno al 40 %. Esto se debe a que al incrementar el radio de cobertura, los nodos son capaces de establecer más enlaces con sus nodos vecinos y por eso, con valores de eficiencia más bajos las prestaciones de la red aumenten respecto al escenario anterior.

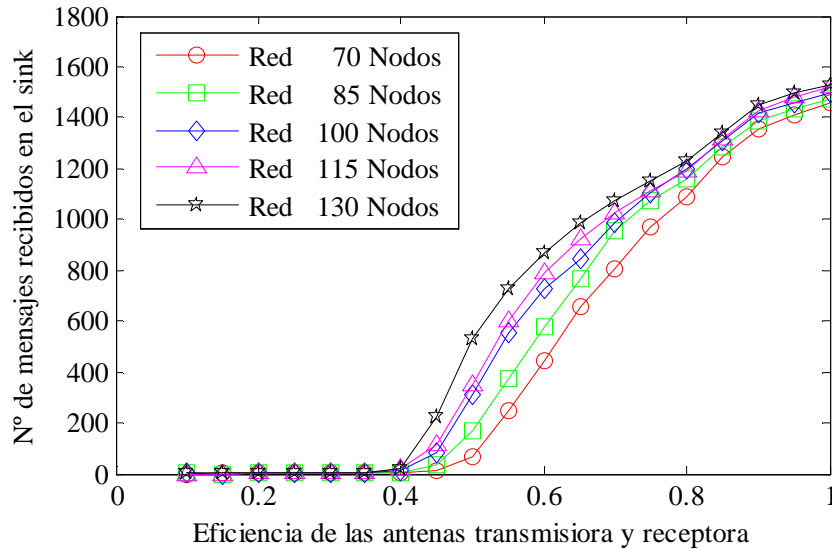


Figura 35.- Comparativa para distintas densidades de red del número de mensajes recibidos en el nodo destino cuando varía la eficiencia de las antenas (ideales). El radio de cobertura de los sensores es 250 m.

Si se comparan las prestaciones de las redes cuando cambia la densidad de la misma, Figura 35, también se observa que a mayor densidad de nodos, mejor es el rendimiento de la red de sensores, se reciben más mensajes en destino.

Por último, se exponen los resultados para el escenario donde el radio de cobertura es aún mayor, 300 m. Como se observa en la Figura 36 y Figura 37, la red consigue mejores prestaciones para valores de eficiencia más bajos. En este caso, el umbral de eficiencia se desplaza ligeramente hacia valores inferiores de eficiencia (por debajo del 40%).

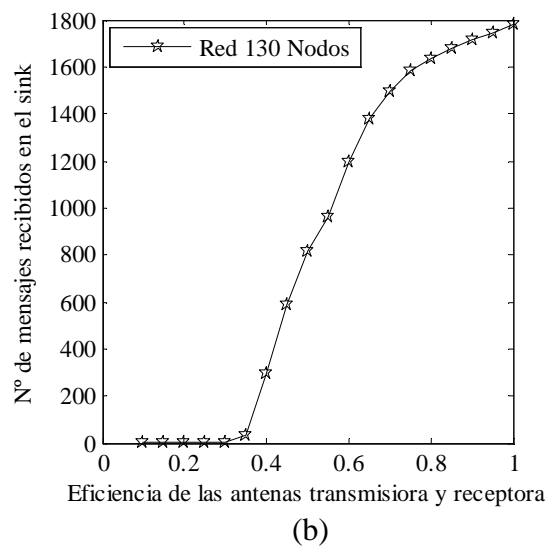
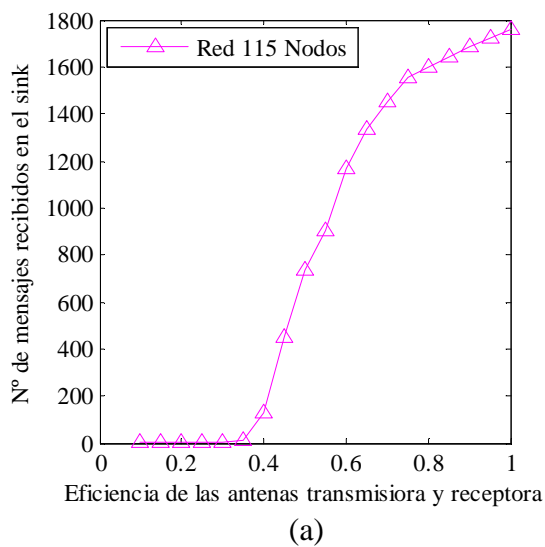


Figura 36.- Número de mensajes recibidos en el sink cuando varía la eficiencia de las antenas en una red con (a) 115 nodos, (b) 130 nodos. El radio de cobertura de los sensores es 300 m.

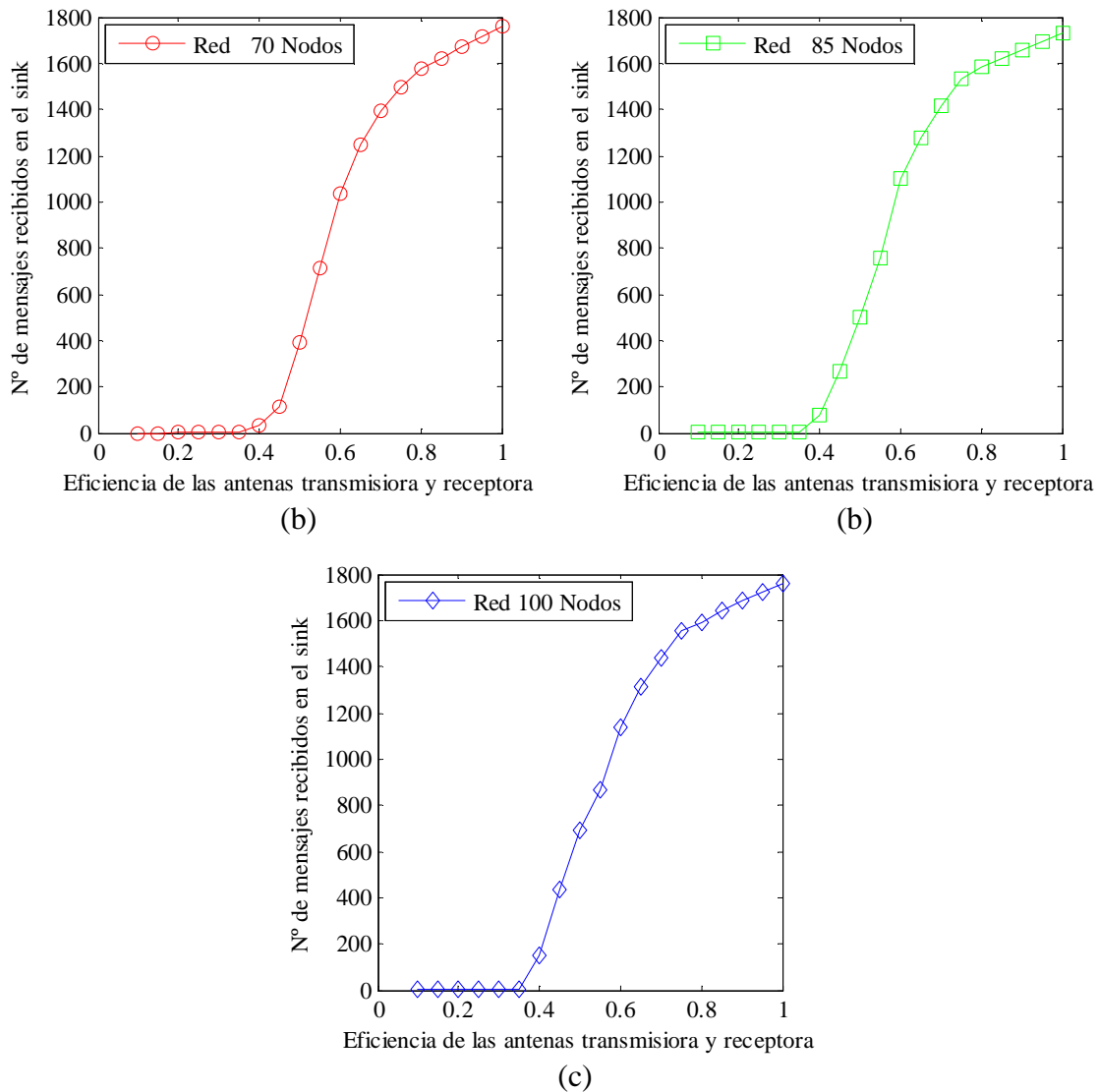


Figura 37.- Número de mensajes recibidos en el sink cuando varía la eficiencia de las antenas en una red con (a) 70 nodos, (b) 85 nodos, y (c) 100 nodos. El radio de cobertura de los sensores es 300 m.

Del mismo modo, al aumentar la densidad de la red, el número de mensajes recibidos en destino se incrementa (Figura 38). Sin embargo, la diferencia de prestaciones se aprecia menos cuando el radio de cobertura de los nodos es alto y la eficiencia de las antenas también lo es. Este efecto se puede observar claramente al comparar la Figura 32, Figura 35 y Figura 38. Las curvas de prestaciones para diferentes densidades de red están más cercanas cuando el radio de cobertura de los nodos es mayor (Figura 38) que cuando es inferior (Figura 32), especialmente cuando la eficiencia de las antenas es elevada. Por eso, aumentar la densidad de la red cuando el radio de cobertura es grande no es muy útil, ya que la mejora en las prestaciones es baja. Esto es lógico ya que al tener los nodos un mayor alcance, no necesitan tener muchos vecinos para hacer llegar la información al destino en pocos saltos.

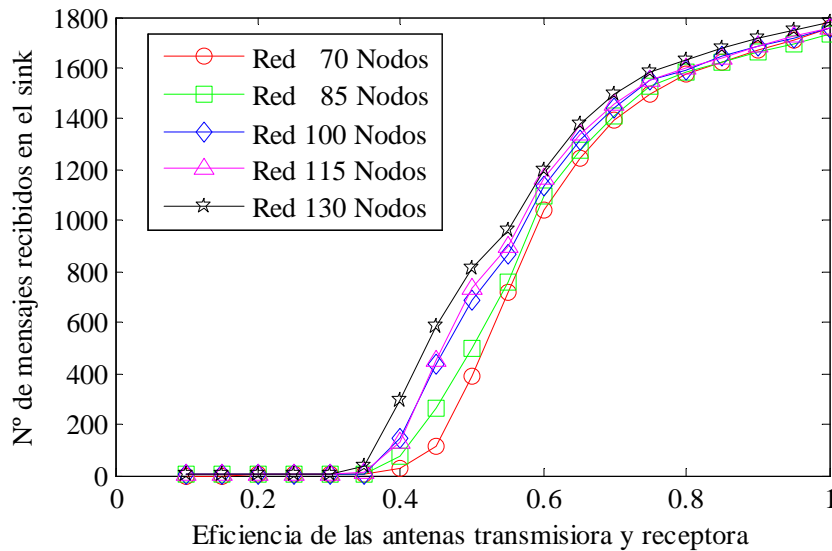


Figura 38.- Comparativa para distintas densidades de red del número de mensajes recibidos en el nodo destino cuando varía la eficiencia de las antenas (ideales). El radio de cobertura de los sensores es 300 m.

Por tanto, para mejorar las prestaciones de la red de sensores cuando se utilizan antenas ideales y manteniendo fijo el radio de cobertura de los nodos se puede aumentar la eficiencia de las antenas transmisora y receptora, así como el número de nodos de la red. A partir de los resultados aquí obtenidos se puede buscar a un compromiso entre el número de nodos que se despliegan y la eficiencia que tienen las antenas empleadas, dependiendo de los requisitos de la aplicación.

Por otro lado, también se ha observado que el radio de cobertura de los nodos influye en las prestaciones del sistema. En la Figura 39 se muestra el número de mensajes recibidos en el nodo destino para topologías de 100 nodos cuando se consideran distintos radio de cobertura (*delta*).

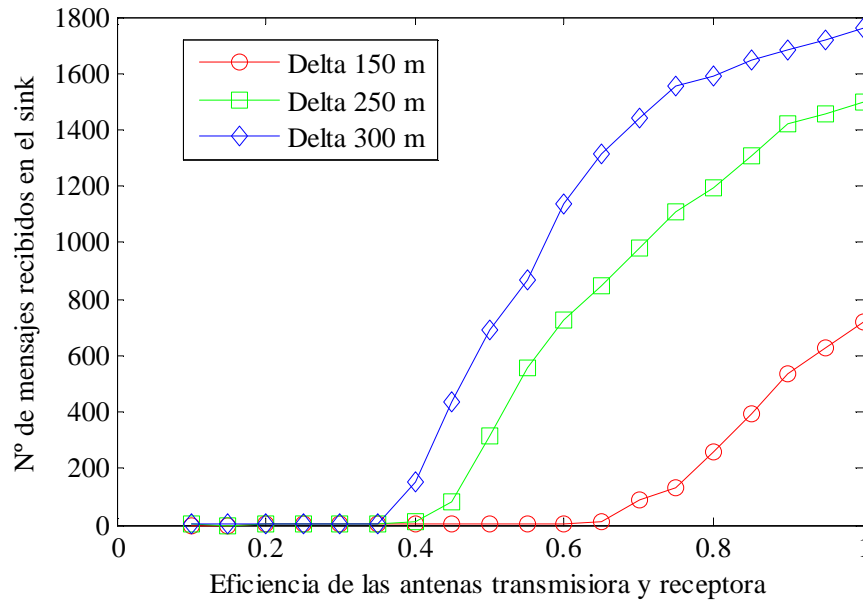


Figura 39.- Comparativa del número de mensajes recibidos en el nodo destino cuando varía la eficiencia de las antenas (ideales) y para distintos radios de cobertura de los nodos. Redes con 100 nodos.

Como se observa en la Figura 39, a mayor radio de cobertura, mayor número de mensajes recibidos en destino ya que los nodos tienen mayor alcance y los mensajes que transmiten dan menos saltos hasta el destino, ahorrando baterías (hay que tener en cuenta que el gasto energético debido a una transmisión es el mismo para los valores de radio de cobertura considerados). El mismo comportamiento se aprecia en redes con diferente número de nodos, tal y como se muestra en la Figura 40. Otro hecho a remarcar en ambas figuras es que al aumentar el radio de cobertura se pueden conseguir las mismas prestaciones con eficiencias de antenas más bajas. Como ya se ha comentado, el umbral en la eficiencia se desplaza a la derecha (eficiencias más altas), a medida que el valor de *delta* decrece.

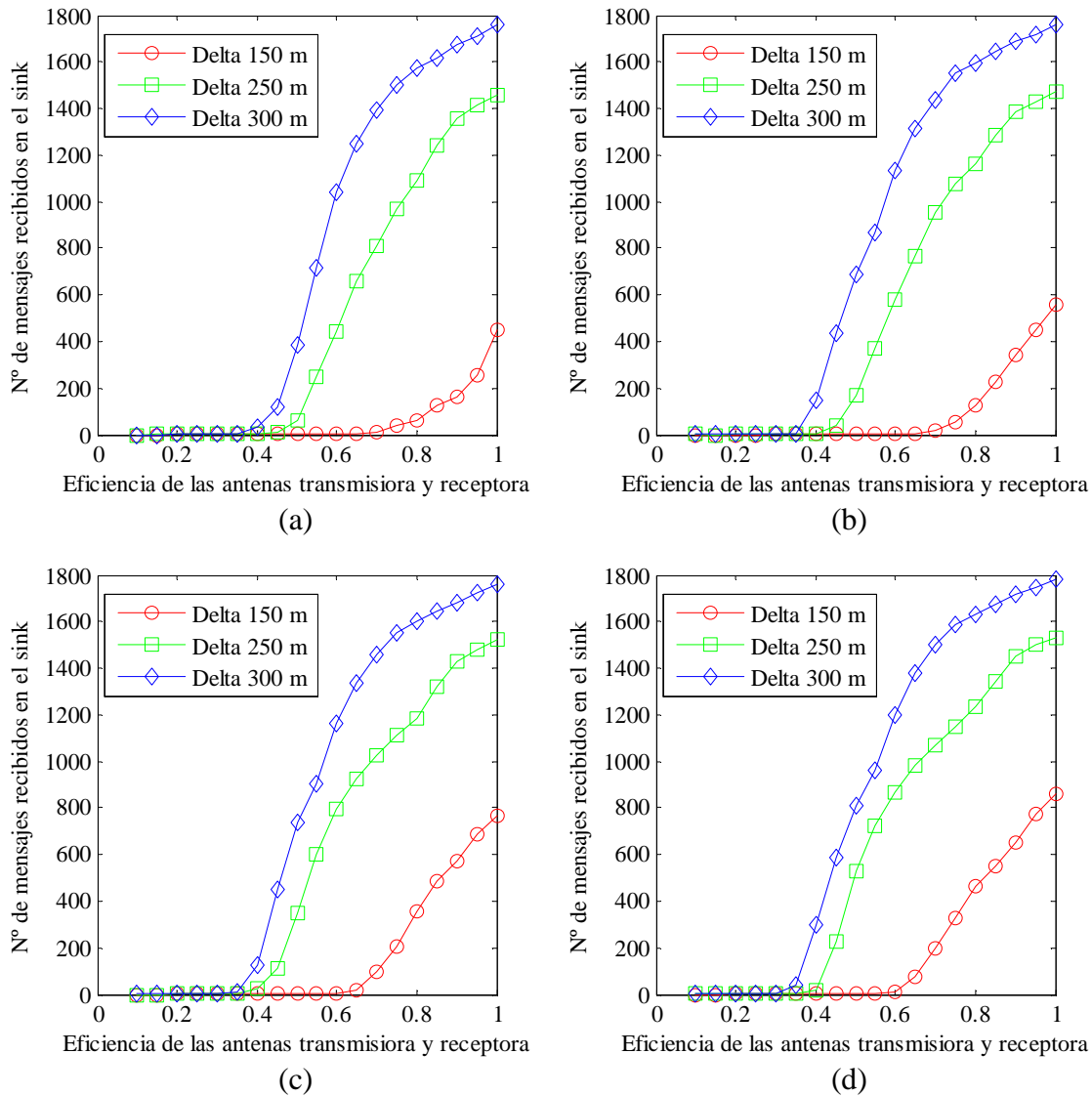


Figura 40.- Comparativa del número de mensajes recibidos en el nodo destino cuando varía la eficiencia de las antenas (ideales) y para distintos radios de cobertura de los nodos en redes con (a) 70 nodos, (b) 85 nodos, (c) 115 nodos, y (d) 130 nodos.

A la vista de los resultados obtenidos para el caso de antenas ideales, cuanto más densa es la red de sensores mejores son las prestaciones (siempre que el radio de cobertura no sea demasiado elevado). En cuanto a la eficiencia y el radio de cobertura se debe buscar un compromiso para garantizar los requisitos deseados, bien reduciendo el radio de cobertura y utilizar antenas con una mayor eficiencia, o al contrario, menor eficiencia en las antenas con un radio de cobertura elevado.

b. Segundo escenario: antenas dipolo

Igual que en el escenario de antenas ideales, se consideran diferentes densidades de red, las mismas eficiencias en la antena transmisora y receptora (red homogénea), y diferentes radios de cobertura de los sensores (150, 250 y 300 m). De esta manera se podrá realizar un estudio comparativo de las prestaciones de la red en ambos escenarios.

Sin embargo, es de esperar que el hecho de utilizar un diagrama de radiación no ideal degeneren las prestaciones de la red de sensores.

Como se comentó en el capítulo 4, se van a analizar los resultados para dos casos. En el primero, los dipolos se posicionan aleatoriamente en un plano, y en el segundo los dipolos se colocan aleatoriamente en el espacio.

Entorno de trabajo 2 dimensiones

En esta sección se analizan las prestaciones de las redes de sensores cuando se varía la eficiencia de las antenas transmisora y receptora, así como el diagrama de radiación que éstas presentan. A continuación se presentan los resultados obtenidos en las simulaciones para los distintos casos propuestos.

Se va a estudiar el efecto de variar la eficiencia en las antenas transmisora y receptora, así como el hecho de considerar dipolos de distintas longitudes en los sensores y diferente densidad de red. A continuación se presentan los casos propuestos y los resultados obtenidos en las simulaciones.

A fin de realizar un estudio comparativo con el escenario ideal, se van a utilizar los mismos radios de cobertura considerados en el apartado estudio, pero inicialmente el número de nodos desplegado es igual a 100. En primer lugar se muestran los resultados para distintas longitudes de dipolo cuando el radio de cobertura es de 150 metros (Figura 41).

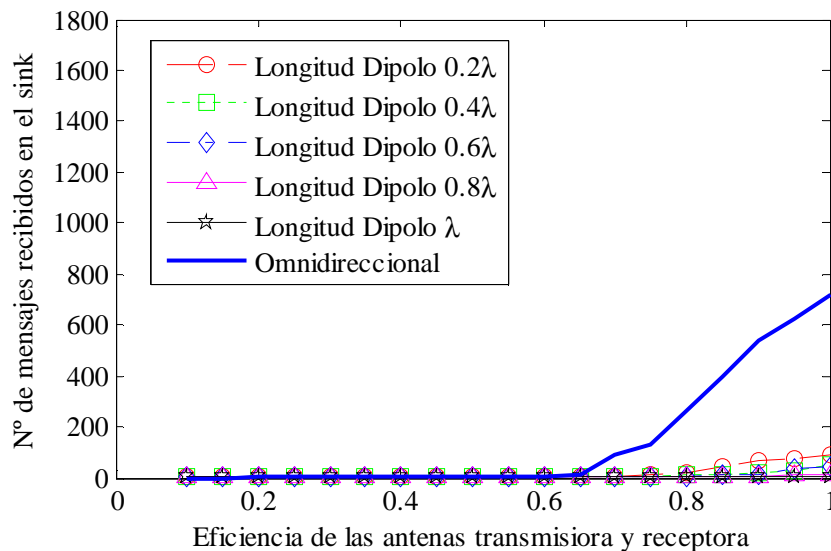


Figura 41.- Número de mensajes recibidos en el nodo destino cuando varía la eficiencia de las antenas para distintas longitudes de dipolo en una red de 100 nodos. También se incluyen resultados para la red con antenas ideales. El radio de cobertura de los sensores es 150 m.

En la Figura 41 se observa cómo las prestaciones de la red de sensores han caído bruscamente respecto al caso ideal, degenerando casi por completo el funcionamiento de la red. Las antenas presentan mayor directividad en una dirección del

espacio que en otra, lo que da lugar a que el número de enlaces que se establecen entre nodos se vea afectado por la orientación de los sensores en la red, que unido al hecho de que los sensores tienen poco alcance hace que las prestaciones disten mucho de la red con antenas ideales.

Respecto a la eficiencia el comportamiento es el mismo que en el caso omnidireccional, es decir, al aumentar la eficiencia se mejoran las prestaciones de la red. Para ver cuáles son las prestaciones en función de la longitud del dipolo empleado, se representa en la Figura 42 un zoom de la Figura 41 para valores altos de eficiencia. Se observa que el número de mensajes recibidos en el nodo destino ha descendido de manera notoria respecto al caso de antenas omnidireccionales, llegando a ser prácticamente nulo en el caso de que la longitud del dipolo sea la longitud de onda. Para longitudes de dipolo menores (el diagrama de radiación se aproxima más al omnidireccional), las prestaciones mejoran aunque levemente (se reciben más mensajes en el sink). Sin embargo, las prestaciones de una red donde los sensores tienen antenas tipo dipolo y el radio de cobertura es de 150 m, no son aceptables.

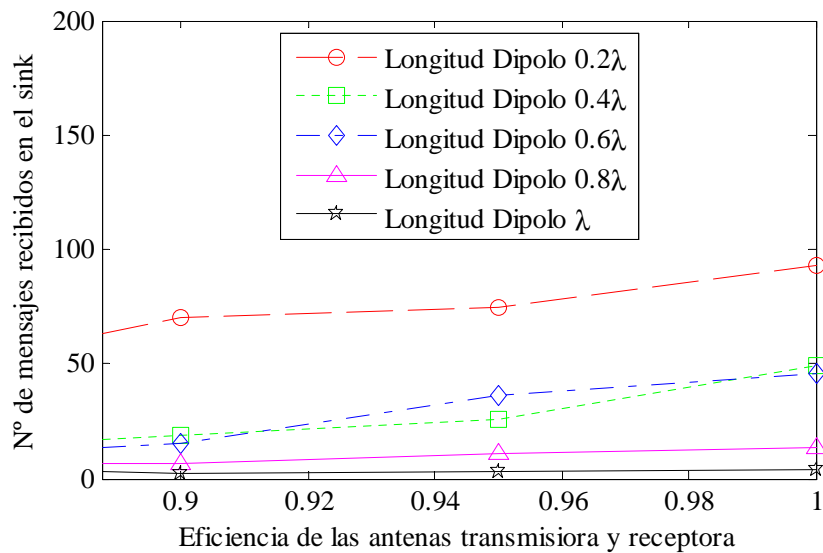


Figura 42.- Zoom de la Figura 41 cuando la eficiencia de las antenas transmisora y receptora es elevada.

A continuación, en la Figura 43 se muestran los resultados para un radio de cobertura de 250 metros, con las mismas consideraciones que en el caso anterior.

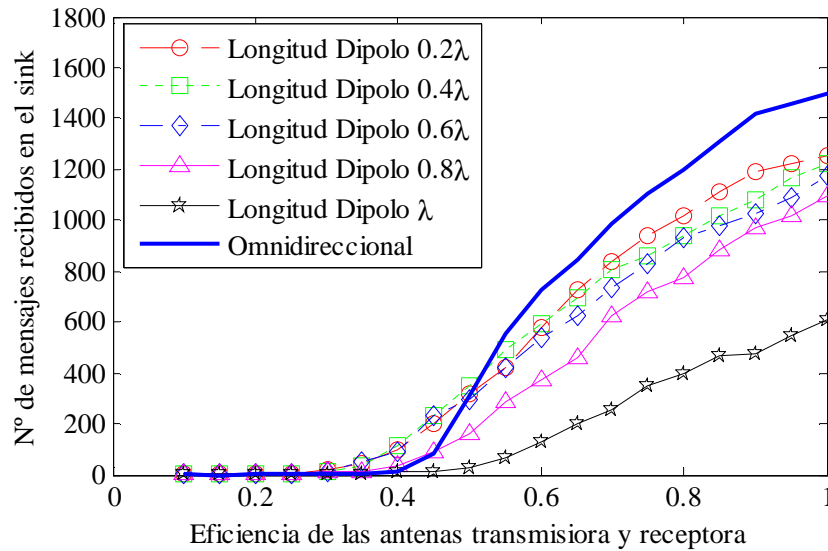


Figura 43.- Número de mensajes recibidos en el nodo destino cuando varía la eficiencia de las antenas para distintas longitudes de dipolo en una red de 100 nodos. También se incluyen resultados para la red con antenas ideales. El radio de cobertura de los sensores es 250 m.

Como cabía esperar, las prestaciones de la red empeoran respecto al caso omnidireccional, agravándose a medida que aumenta la longitud del dipolo. Aumentar el tamaño del dipolo implica, de acuerdo a (3.3), tener un diagrama de radiación más directivo, es decir, menos omnidireccional, que origina un peor rendimiento en la red de sensores ya que los enlaces entre nodos sólo se establecen cuando los sensores están bien orientados (no presentan nulos en el diagrama de radiación). Sin embargo, los resultados obtenidos han mejorado al aumentar el radio de cobertura de los sensores (compárese Figura 44 y Figura 45), de modo que obtienen prestaciones aceptables para longitudes de dipolo bajas. Por otro lado, el efecto de variar la eficiencia de las antenas es el mismo que en caso ideal: al aumentar la eficiencia, las prestaciones del sistema mejoran. No se puede dar un umbral mínimo de eficiencia común a las diferentes longitudes del dipolo, ya que se observa que cuanto más pequeño es el dipolo (menos directivo es su diagrama de radiación), el umbral se desplaza a valores más bajos de eficiencia. De hecho, para longitudes de dipolo 0.2λ y 0.4λ y valores de eficiencia en torno al 35-40 %, se obtiene un mayor número de mensajes recibidos en el nodo destino comparado con la antena omnidireccional. Esto se debe a que los dipolos presentan mayor directividad en ciertas direcciones del espacio, haciendo que la distancia equivalente dada por (3.1) se haga más pequeña, posibilitando el establecimiento de enlaces de comunicación entre nodos que antes no se daba. Este efecto de creación de enlaces a bajos valores de eficiencia se puede apreciar en el ejemplo de la Figura 46, donde las redes tienen 20 nodos en un campo de sensores de $300 \times 300 \text{ m}^2$. Se ha considerado una eficiencia en las antenas del 35 % para ambas topologías.

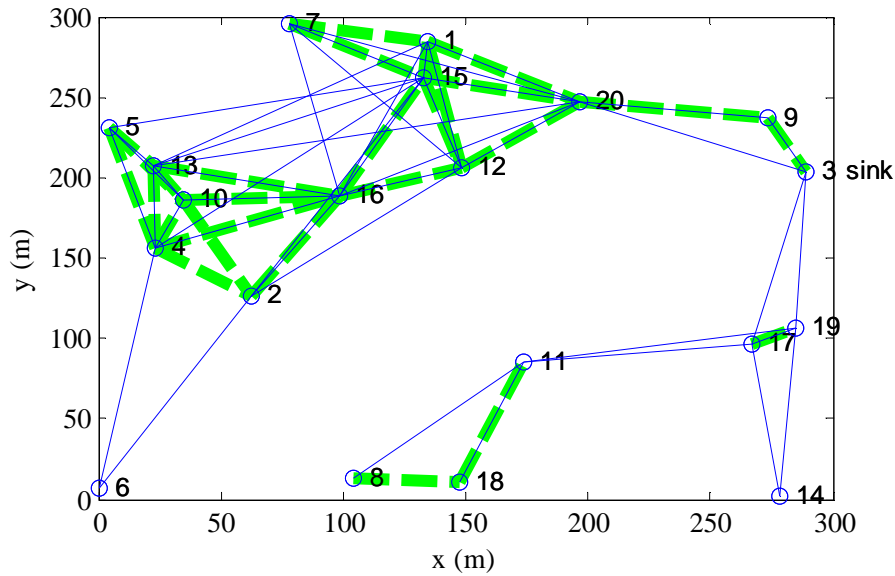


Figura 44.- En trazo discontinuo y color verde, enlaces establecidos en una red de 20 nodos con antenas ideales y eficiencia del 35 %. En trazo continuo y color azul, enlaces establecidos en una red de 20 nodos con antenas dipolo de longitud 0.2λ y eficiencia del 35 %.

En la Figura 44 se observa que los dipolos establecen más enlaces que en el caso ideal cuando las eficiencias de las antenas son bajas, haciendo que la red esté más conectada y mejorando los resultados en cuanto a número de mensajes recibidos en el nodo destino se refiere. Sin embargo, a altas eficiencias ocurre lo contrario. El hecho de tener direcciones del espacio en las que la directividad del dipolo es pequeña o incluso nula, aumenta la distancia equivalente entre los nodos haciendo que se establezcan menos enlaces. La Figura 45 muestra un ejemplo para una red de 20 nodos para antenas ideales y dipolos de 0.2λ de longitud con eficiencias del 100 %.

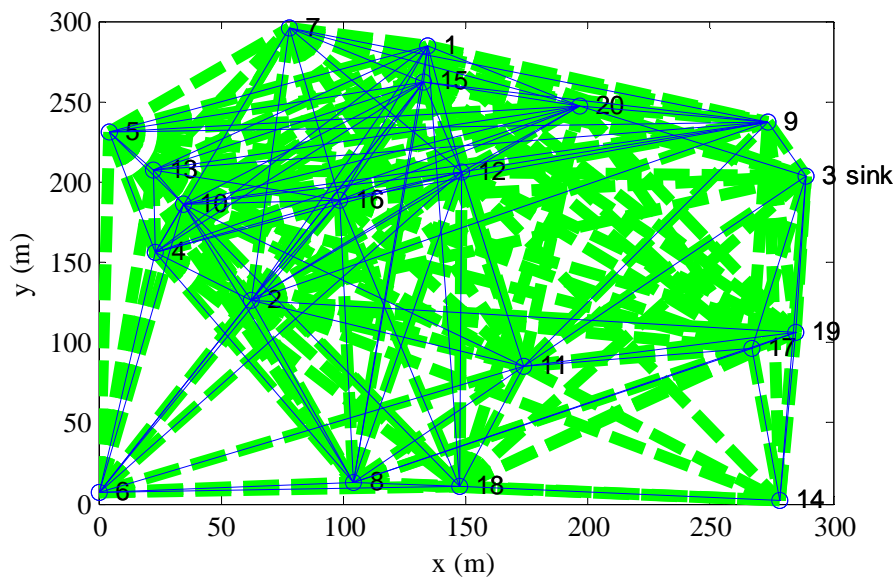


Figura 45.- En trazo discontinuo y color verde, enlaces establecidos en una red de 20 nodos con antenas ideales y eficiencia del 100 %. En trazo continuo y color azul, enlaces establecidos en una red de 20 nodos con antenas dipolo de longitud 0.2λ y eficiencia del 100 %.

enlaces establecidos en una red de 20 nodos con antenas dipolo de longitud 0.2λ y eficiencia del 100 %.

Finalmente, se presentan los resultados obtenidos cuando el radio de cobertura es de 300 metros. La Figura 46 muestra el número de mensajes recibidos en el sink para diferentes valores de eficiencia de las antenas y diferentes longitudes de dipolo, así como para la antena omnidireccional.

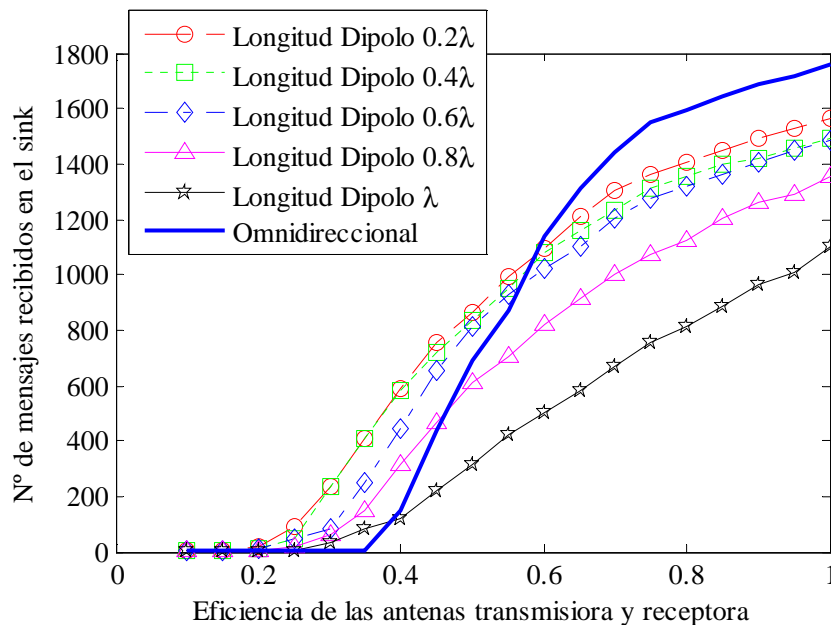


Figura 46.- Número de mensajes recibidos en el nodo destino cuando varía la eficiencia de las antenas para distintas longitudes de dipolo en una red de 100 nodos. También se incluyen resultados para la red con antenas ideales. El radio de cobertura de los sensores es 300 m.

Se observa que el efecto sobre las prestaciones del aumento la eficiencia de las antenas es el mismo que en casos anteriores (mejoran al incrementar la eficiencia). También ocurre que a bajas eficiencias mejoran los resultados con respecto a redes con antenas ideales. Si bien, ahora los efectos se hacen significativos a eficiencias más bajas, en torno al 25 %, y se prolongan hasta eficiencias más altas, en torno al 60 %. La razón es de nuevo el hecho de tener un diagrama de radiación no constante en todas las direcciones, que a bajas eficiencias es capaz de establecer enlaces en ciertas direcciones que la antena ideal no puede (restringido por el valor bajo de eficiencia) junto con el hecho de que los nodos tengan mayor radio de cobertura y sean capaces de llegar a más nodos. Este mismo efecto es el culpable de la degradación del sistema a altas eficiencias donde se generan menos enlaces que en caso ideal.

Por otro lado, se observa en la Figura 46 que cuanto mayor es la longitud del dipolo peor son las prestaciones de la red de sensores. Como en el caso anterior, cuanto más directivo es el diagrama de radiación del dipolo, transmite y/o recibe en menos direcciones del espacio, y más se degeneran las prestaciones de la red.

A continuación, en la Figura 47 y Figura 48 se muestra una comparativa de la variación del radio de cobertura de los sensores para las cinco longitudes de dipolo

consideradas. No se ha representado para $\Delta=150$ m ya que se ha observado claramente que los resultados son considerablemente peores que en los otros dos casos.

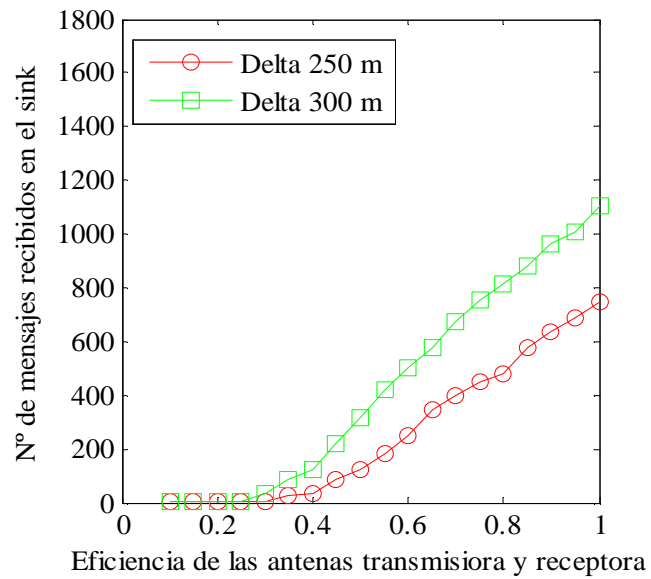


Figura 47.- Número de mensajes recibidos en el nodo destino cuando varía la eficiencia de las antenas y el radio de cobertura de los sensores para una red de 100 nodos y longitud del dipolo igual a λ .

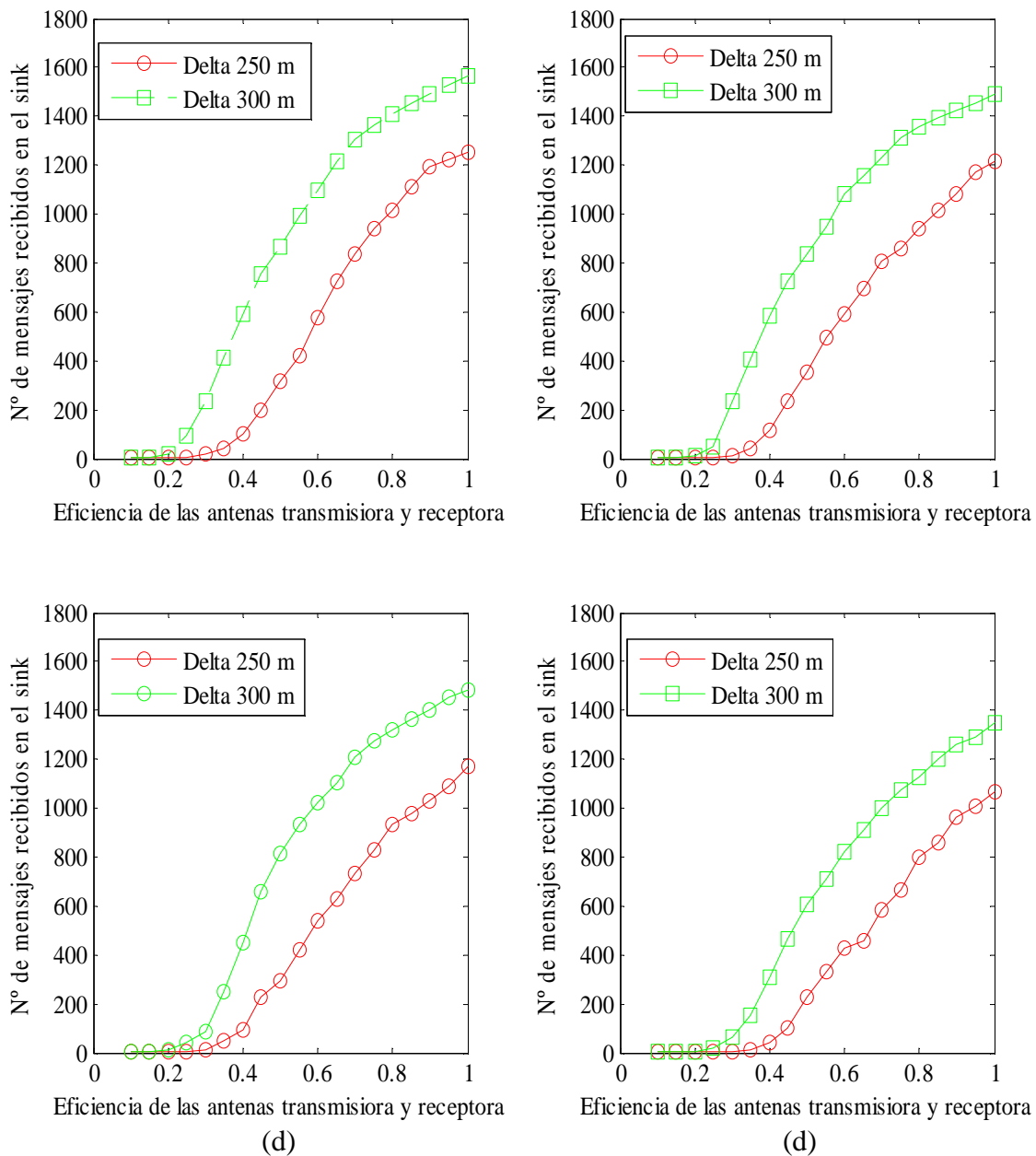


Figura 48.- Número de mensajes recibidos en el nodo destino cuando varía la eficiencia de las antenas y el radio de cobertura de los sensores para una red de 100 nodos y longitud del dipolo igual a (a) 0.2λ , (b) 0.4λ , (c) 0.6λ , y (d) 0.8λ .

Se observa cómo aumentar el radio de cobertura mejora las prestaciones de la red independientemente de la longitud del dipolo.

Se analiza ahora el hecho de considerar diferente número de nodos en las redes de sensores. Se generan topologías para las densidades de red consideradas, donde los nodos tienen un radio de cobertura de 250 metros. Los resultados obtenidos se muestran de la Figura 49 a la Figura 52.

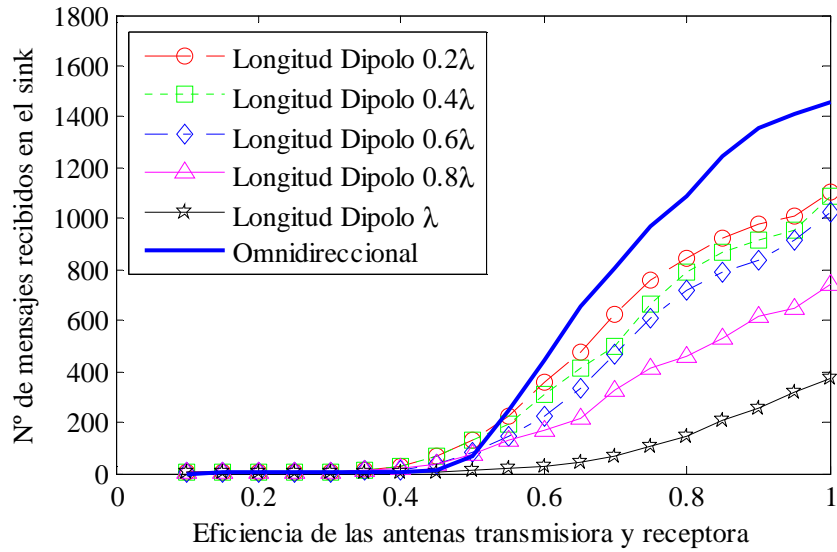


Figura 49.- Número de mensajes recibidos en el nodo destino cuando varía la eficiencia de las antenas para distintas longitudes de dipolo en una red de 70 nodos. También se incluyen resultados para la red con antenas ideales. El radio de cobertura de los sensores es 250 m.

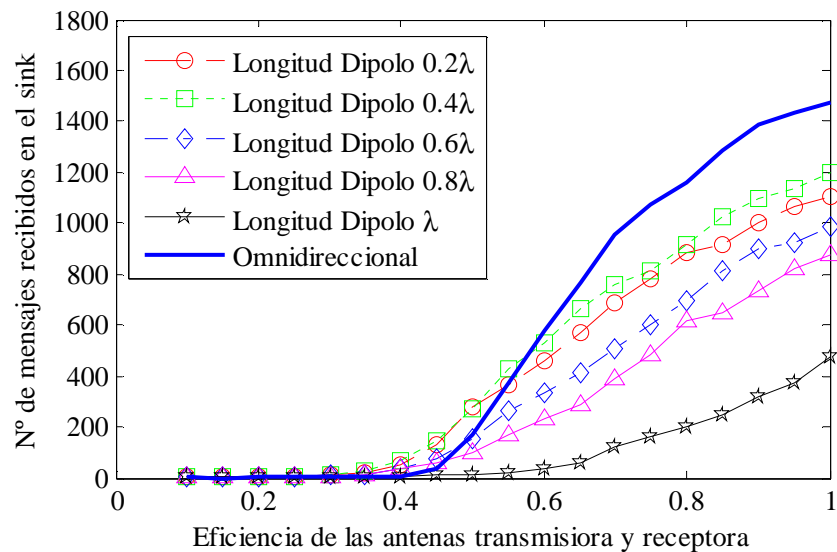


Figura 50.- Número de mensajes recibidos en el nodo destino cuando varía la eficiencia de las antenas para distintas longitudes de dipolo en una red de 85 nodos. También se incluyen resultados para la red con antenas ideales. El radio de cobertura de los sensores es 250 m.

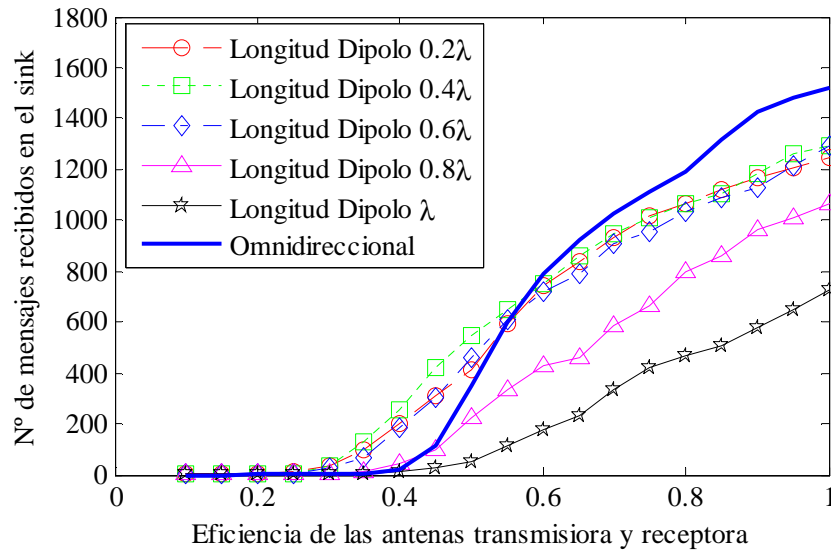


Figura 51.- Número de mensajes recibidos en el nodo destino cuando varía la eficiencia de las antenas para distintas longitudes de dipolo en una red de 115 nodos. También se incluyen resultados para la red con antenas ideales. El radio de cobertura de los sensores es 250 m.

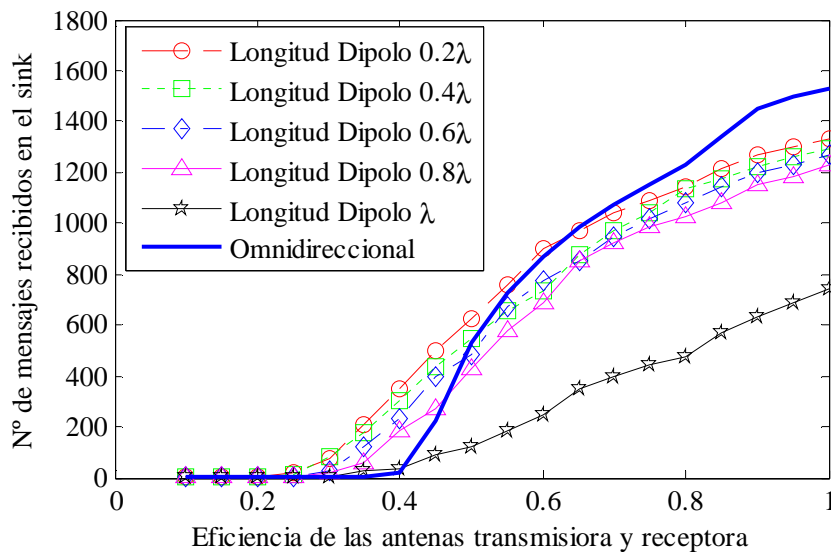


Figura 52.- Número de mensajes recibidos en el nodo destino cuando varía la eficiencia de las antenas para distintas longitudes de dipolo en una red de 130 nodos. También se incluyen resultados para la red con antenas ideales. El radio de cobertura de los sensores es 250 m.

Como se aprecia en las cuatro figuras anteriores, el comportamiento es el mismo que para una red de 100 nodos (Figura 43): el número de mensajes recibidos en destino es menor que para el caso omnidireccional para altas eficiencias. Dependiendo del número de nodos de la red, se puede establecer un umbral en la eficiencia por encima del cual las prestaciones del sistema están por debajo de las obtenidas para el escenario ideal. Así, éste se desplaza hacia la derecha (valores más altos de eficiencia) cuanto

mayor es la densidad de nodos de la topología. A la vista de las gráficas se puede establecer un valor máximo donde el caso ideal mejora siempre al dipolo y se sitúa en torno al 70 % de eficiencia en las antenas. Además, también se observa que a medida que se incrementa la densidad de la red las curvas de los dipolos tienden a aproximarse (excepto cuando la longitud es λ , que es la que peores prestaciones obtiene).

Por último, se ha realizado una comparativa de las prestaciones manteniendo fijo la longitud del dipolo y variando la densidad de la red. En la Figura 53 se muestran los resultados para un dipolo de longitud 0.2λ .

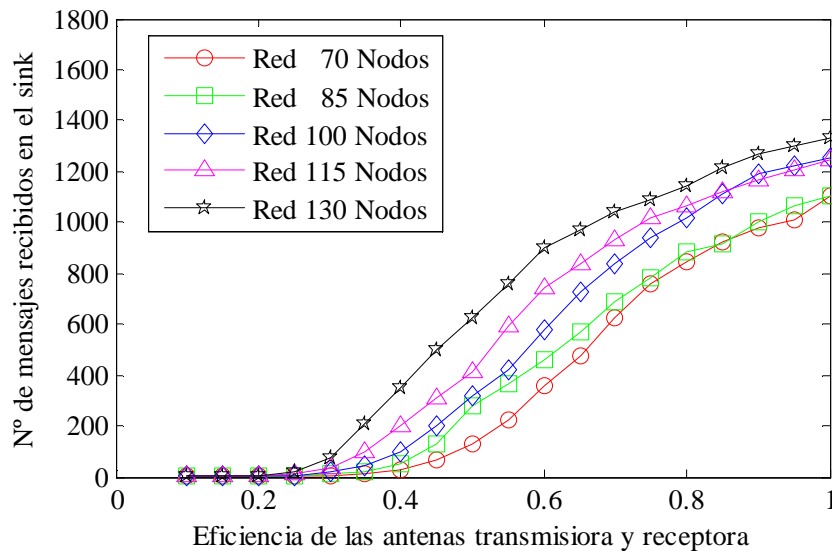


Figura 53.- Número de mensajes recibidos en el nodo destino cuando varía la eficiencia de las antenas y la densidad de red para longitud del dipolo de 0.2λ . El radio de cobertura de los sensores es 250 m.

A mayor número de nodos se reciben más mensajes en el nodo destino. Este resultado es de esperar, ya que al tener más nodos en la misma área, están más cerca unos de otros, posibilitando establecer un mayor número de enlaces. Los resultados para longitudes de dipolo de 0.4λ , 0.6λ , 0.8λ y λ , se muestran de la Figura 54 a la Figura 57.

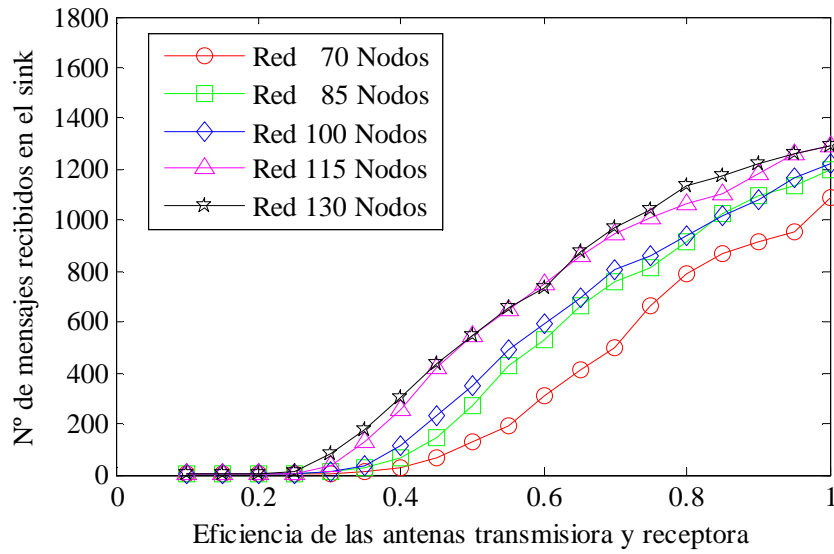


Figura 54.- Número de mensajes recibidos en el nodo destino cuando varía la eficiencia de las antenas y la densidad de red para longitud del dipolo de 0.4λ . El radio de cobertura de los sensores es 250 m.

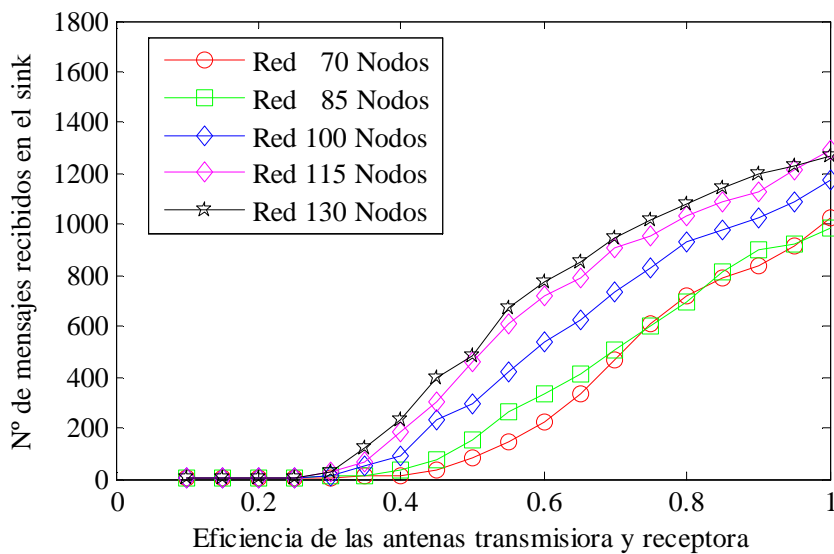


Figura 55.- Número de mensajes recibidos en el nodo destino cuando varía la eficiencia de las antenas y la densidad de red para longitud del dipolo de 0.6λ . El radio de cobertura de los sensores es 250 m.

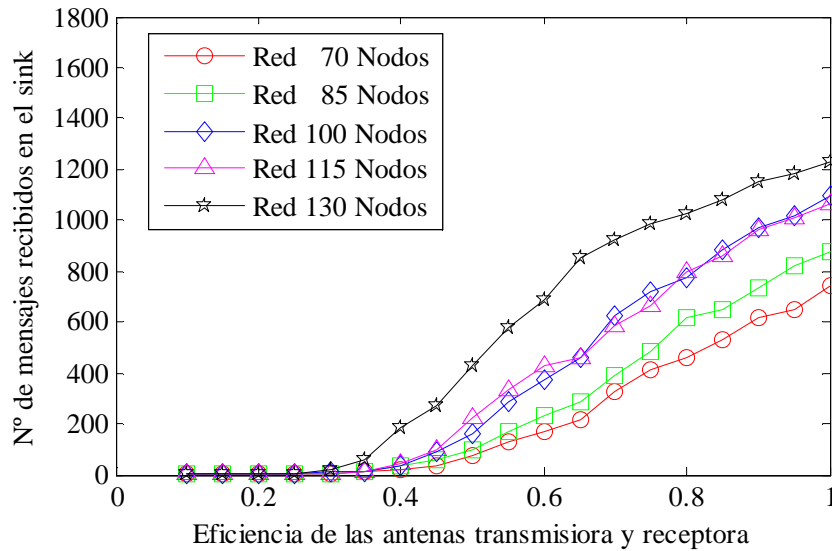


Figura 56.- Número de mensajes recibidos en el nodo destino cuando varía la eficiencia de las antenas y la densidad de red para longitud del dipolo de 0.8λ . El radio de cobertura de los sensores es 250 m.

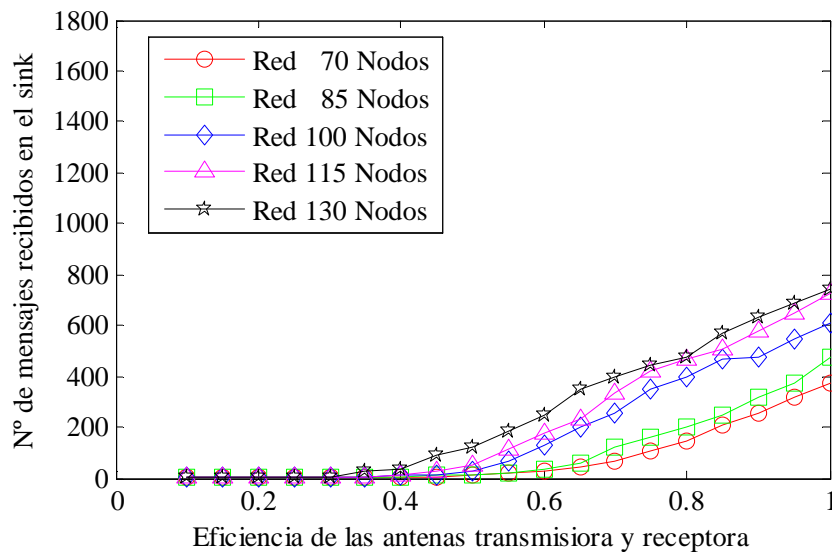


Figura 57.- Número de mensajes recibidos en el nodo destino cuando varía la eficiencia de las antenas y la densidad de red para longitud del dipolo de λ . El radio de cobertura de los sensores es 250 m.

Los resultados para todas las densidades de red consideradas siguen la misma tendencia: a mayor densidad mejores prestaciones, independientemente del diagrama de radiación que se utilice, sin olvidarnos que cuanto más se parezca al diagrama de radiación omnidireccional, mejores serán las prestaciones.

Como se ha visto anteriormente, cuanto mayor sea la eficiencia de las antenas, mejores son las prestaciones. En la Figura 58 se muestra el número de mensajes recibidos en el nodo destino en función del número de nodos de la red para las eficiencias consideradas, considerando dipolos de longitud 0.2λ . Se observa que las

redes con más densidad de sensores obtienen mejores resultados, si bien, al ser el diagrama de radiación del dipolo poco directivo, el incremento de prestaciones al aumentar el número de nodos se produce de forma suave y moderada. En este caso, es preferible tener redes con 70 nodos que con 85 (para un valor de eficiencia dado) ya que las prestaciones alcanzadas son prácticamente similares.

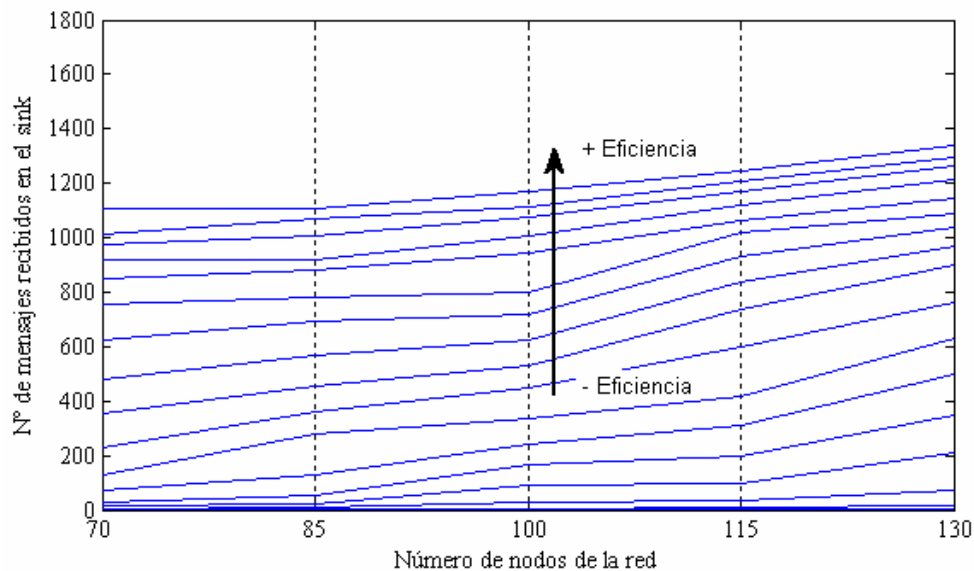


Figura 58.- Número de mensajes recibidos en el nodo destino según la densidad de la red para eficiencias desde el 5% al 100% (incremento en pasos de 5%). Antena dipolo de longitud 0.2λ .

Un comportamiento similar sucede cuando las antenas son dipolos de longitud 0.6λ (Ver Figura 59). En este caso se observa un incremento destacable en las prestaciones cuando se pasa de tener redes de 85 a 115 nodos, mientras que no compensa tener redes de 130 nodos ya que alcanza unos resultados similares a las redes de 115.

En la Figura 60 (dipolo de longitud λ) se observa cómo se produce un aumento significativo en la recepción de mensajes cuando las redes pasan de tener 70 a 100 nodos. Sin embargo, la mejora conseguida al aumentar más el número de nodos (pasar de 100 a 115 o 130) es poco significativa para la mayoría de los valores de eficiencias.

Por tanto, de este análisis es necesario destacar la importancia de analizar cómo varían las prestaciones de la red de sensores según la eficiencia y el número de nodos de la red, ya que en ocasiones, aumentar el número de nodos de la red manteniendo el tipo de sensor (y eficiencia) en las antenas no mejora (o lo hace levemente) las prestaciones de la red. Habría que valorar si la mejora en las prestaciones es suficiente para compensar el incremento de coste que implica aumentar el número de nodos de la red.

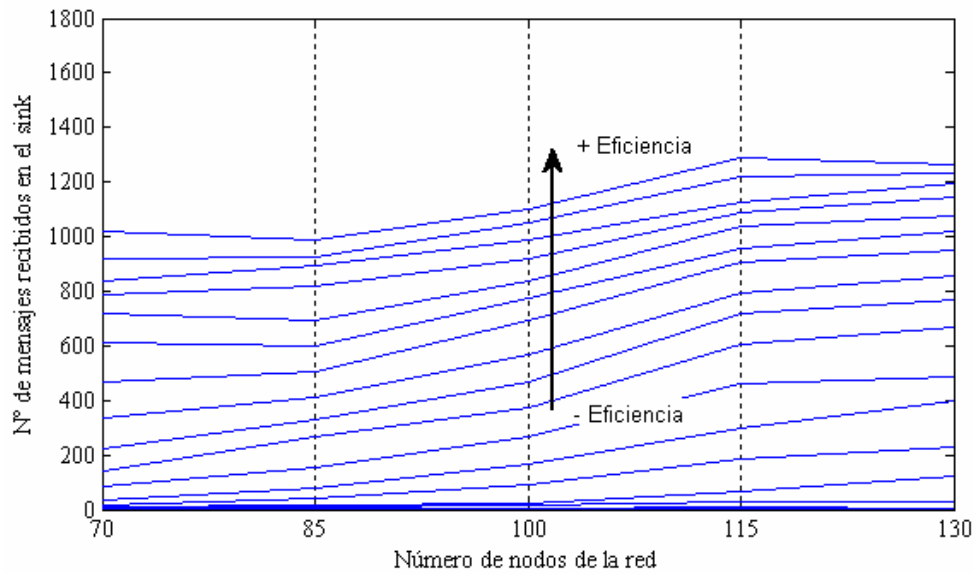


Figura 59.- Número de mensajes recibidos en el nodo destino según la densidad de la red para eficiencias desde el 5% al 100% (incremento en pasos de 5%). Antena dipolo de longitud 0.6λ .

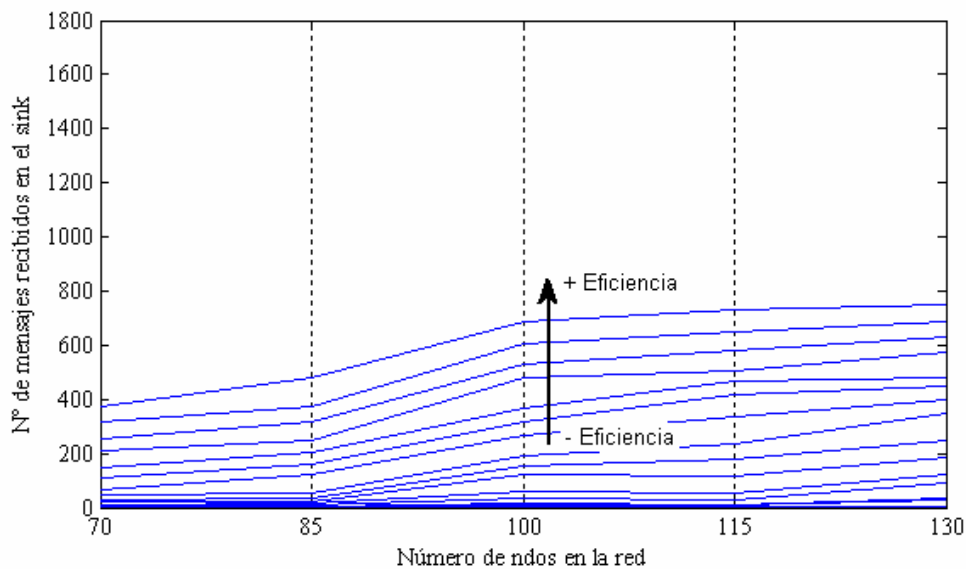


Figura 60.- Número de mensajes recibidos en el nodo destino según la densidad de la red para eficiencias desde el 5% al 100% (incremento en pasos de 5%). Antena dipolo de longitud λ .

Entorno de trabajo 3 dimensiones

A continuación se presentan los resultados obtenidos en las simulaciones, donde se va a estudiar cuál es el comportamiento de las redes cuando varía la longitud del

dipolo situado en el espacio (y por ello el diagrama de radiación del elemento), la densidad de nodos y el radio de cobertura. En los escenarios anteriores, tanto en el ideal como en el dipolo de dos dimensiones colocado en el *plano* xz , se tiene el mismo diagrama de radiación en todos los nodos. En el caso de antenas ideales es evidente, el diagrama de radiación está normalizado a 1 en todas las direcciones del espacio. En caso del dipolo en el *plano* xz , los dipolos presentan, dependiendo de su longitud, el mismo diagrama de radiación en el *plano* xz ya que lo que varía es la posición del diagrama en el *plano* xz , según la orientación del dipolo en el plano. Los resultados que se presentan a continuación han sido obtenidos considerando que los dipolos se orientan libremente en el espacio, generando en cada nodo un diagrama de radiación distinto en el *plano* xy . En este escenario, también se consideran iguales las antenas en transmisión y en recepción.

En primer lugar, se muestran los resultados obtenidos con redes de sensores de 100 nodos con radios de cobertura de 250 y 300 metros, respectivamente. No se estudia el caso de un radio de cobertura de 150 metros ya que como se vio en la sección anterior, las prestaciones son bastante inferiores a los otros dos casos.

La Figura 61 muestra el número de mensajes recibidos en el nodo destino para diferentes eficiencias de las antenas y longitudes de dipolo de 0.2λ hasta λ , además del caso omnidireccional, donde los nodos tienen un radio de cobertura de 250 metros.

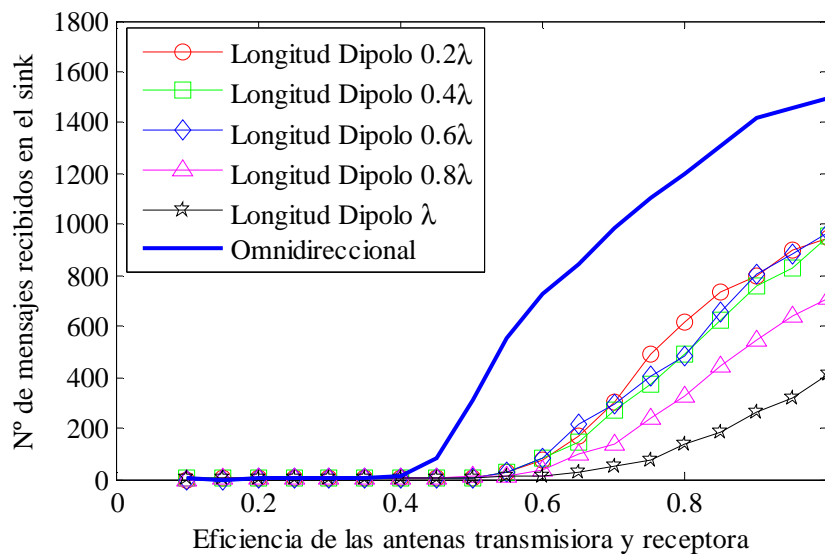


Figura 61.- Número de mensajes recibidos en el nodo destino cuando varía la eficiencia de las antenas para distintas longitudes de dipolo (modelo 3D) en una red de 100 nodos. Se incluyen resultados para la red con antenas ideales. El radio de cobertura de los sensores es 250 m.

Con respecto al caso ideal, el número de mensajes recibidos en destino disminuye como consecuencia de no utilizar un diagrama de radiación constante. En este caso, se observa que el umbral de eficiencia está en torno al 55 %, ya que por debajo de él las prestaciones de la red son prácticamente nulas. Así, el umbral está desplazado a la derecha con respecto al caso ideal y situado en valores de eficiencia más altas. Por tanto, ya no se observa el efecto que aparecía para el escenario bidimensional:

para valores bajos de eficiencia las prestaciones de la red donde las antenas eran dipolos superaban a las omnidireccionales. Además, el número de mensajes recibidos en el *sink* crece más rápidamente para longitudes de dipolo más pequeñas, donde los diagramas de radiación son menos directivos.

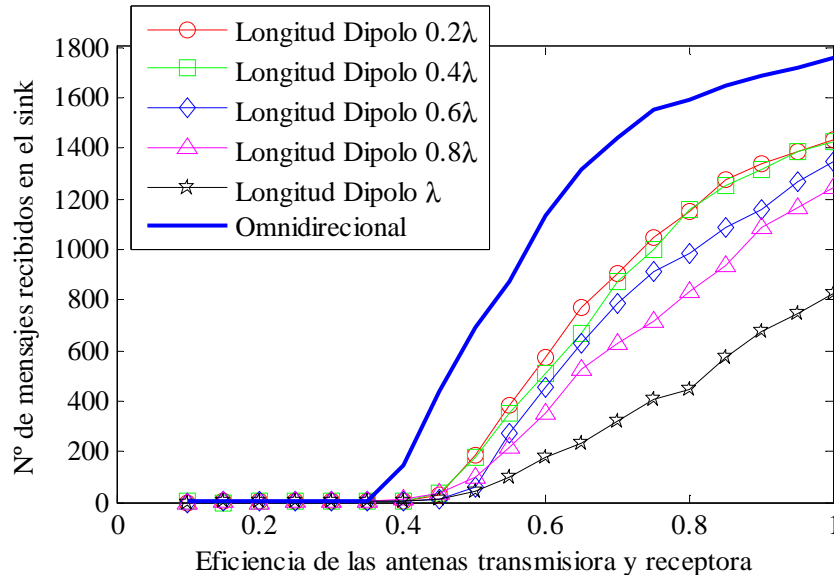


Figura 62.- Número de mensajes recibidos en el nodo destino cuando varía la eficiencia de las antenas para distintas longitudes de dipolo (modelo 3D) en una red de 100 nodos. Se incluyen resultados para la red con antenas ideales. El radio de cobertura de los sensores es 300 m.

La Figura 62 muestra los resultados obtenidos utilizando un radio de cobertura de 300 m en redes con 100 nodos. En este caso, el umbral de eficiencia toma valores más bajos (en torno al 45%). Por otro lado, si se comparan los resultados de este escenario (dipolo orientado en tres dimensiones) con el dipolo de dos dimensiones, se observa cómo el modelar el dipolo de forma más realista afecta levemente a las prestaciones de la red, ya que el número de mensajes recibidos no se ve afectado excesivamente (aunque evidentemente, es ligeramente inferior en el último escenario).

En la Figura 63 y Figura 64 se comparan las prestaciones para cada una de las longitudes de dipolo y radios de cobertura considerados. Tal y como cabe esperar, al aumentar el radio de cobertura las prestaciones de la red aumentan. Cabe destacar que las prestaciones obtenidas para longitud de dipolo 0.2λ y 0.4λ son similares para ambos radios de cobertura.

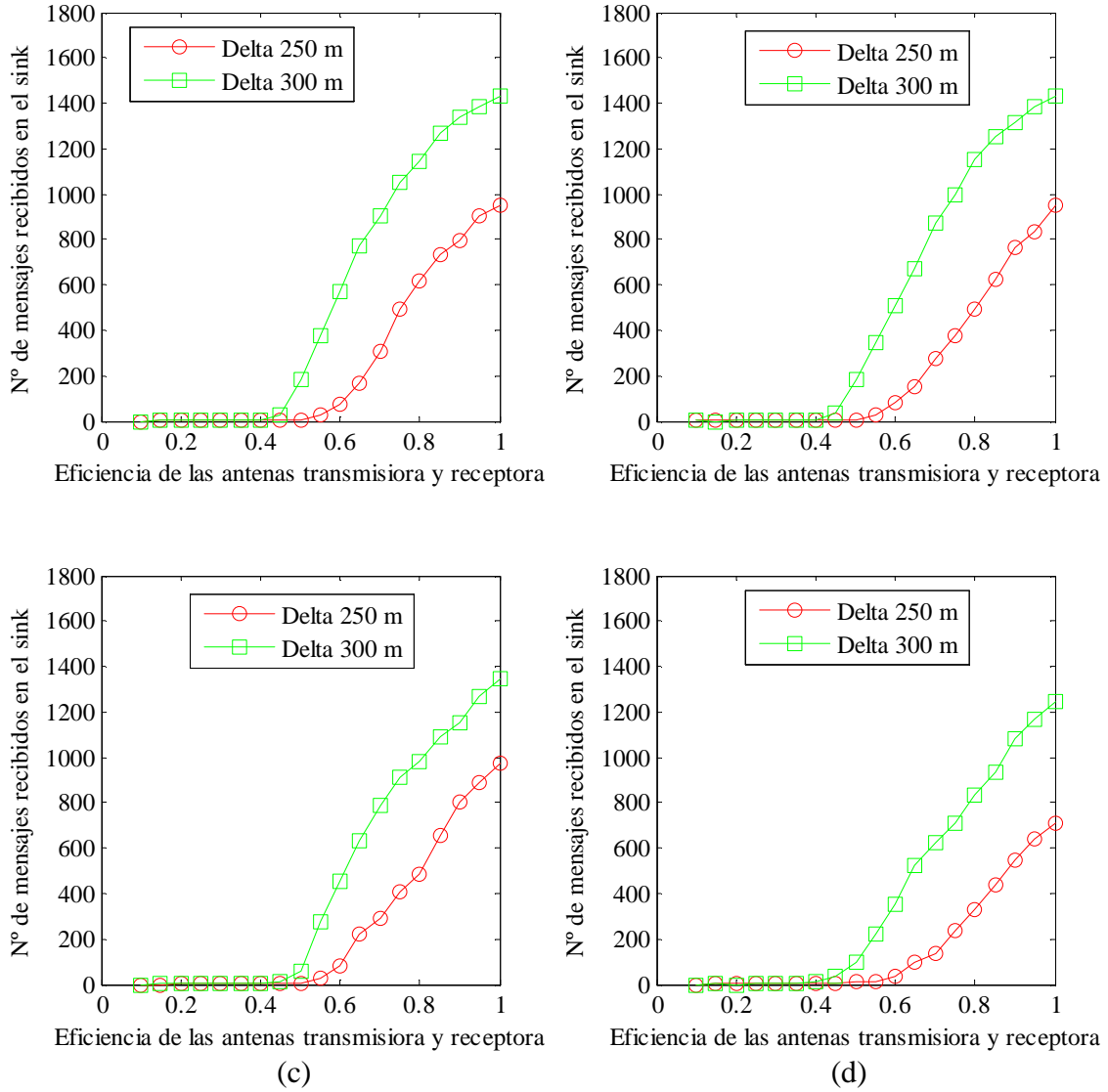


Figura 63.- Número de mensajes recibidos en el nodo destino cuando varía la eficiencia de las antenas y el radio de cobertura de los sensores para en una red de 100 nodos y longitud del dipolo igual a (a) 0.2λ , (b) 0.4λ , (c) 0.6λ , y (d) 0.8λ (modelo 3D).

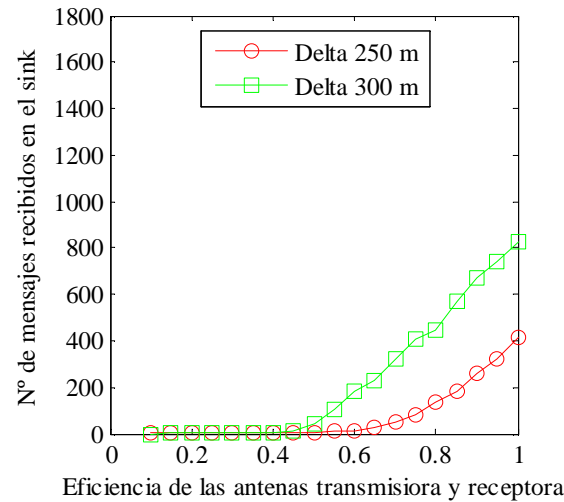


Figura 64.- Número de mensajes recibidos en el nodo destino cuando varía la eficiencia de las antenas y el radio de cobertura de los sensores para en una red de 100 nodos y longitud del dipolo igual a λ (modelo 3D).

A continuación, se muestran los resultados cuando varía la densidad de nodos y se mantiene el radio de cobertura a 250 metros. La Figura 65 representa el número de mensajes recibidos en el nodo destino para redes de 70 nodos con antenas dipolo de diferente longitud. Se puede concluir a la vista de los resultados que utilizar diagramas de radiación más directivos, degenera las prestaciones del sistema.

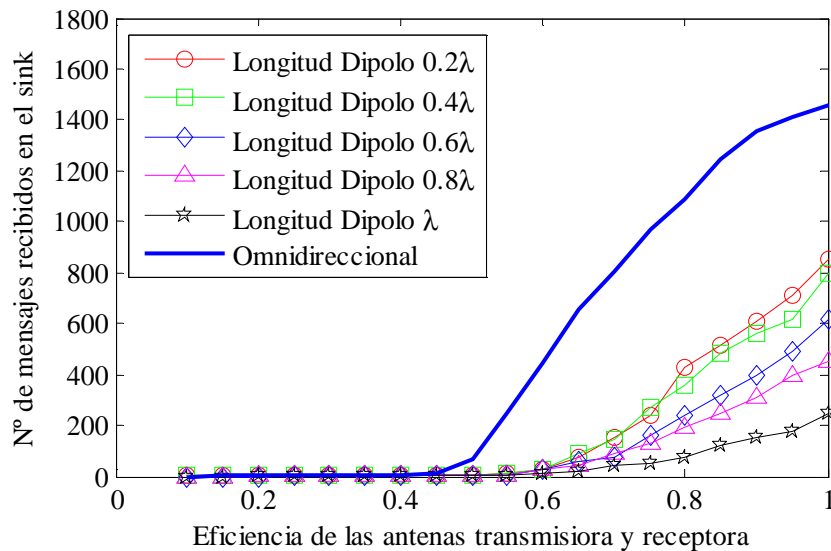


Figura 65.- Número de mensajes recibidos en el nodo destino cuando varía la eficiencia de las antenas para distintas longitudes de dipolo (modelo 3D) en una red de 70 nodos. También se incluyen resultados para la red con antenas ideales. El radio de cobertura de los sensores es 250 m.

Como cabía esperar, el funcionamiento de la red de sensores mejora cuanto mayor es la eficiencia en las antenas. Los resultados para otras densidades de red se

muestran en la Figura 66, Figura 67, Figura 68. En cuanto al diagrama de radiación, el utilizar diagramas más directivos empeora los resultados.

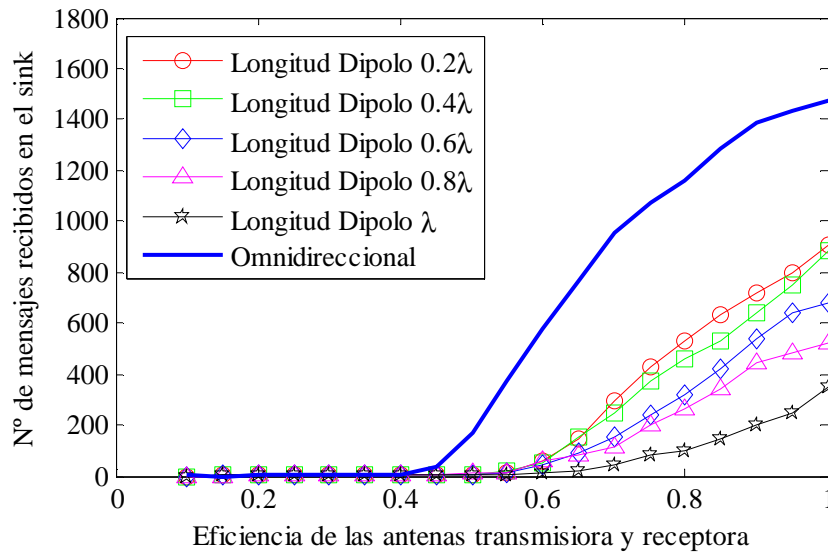


Figura 66.- Número de mensajes recibidos en el nodo destino cuando varía la eficiencia de las antenas para distintas longitudes de dipolo (modelo 3D) en una red de 85 nodos. También se incluyen resultados para la red con antenas ideales. El radio de cobertura de los sensores es 250 m.

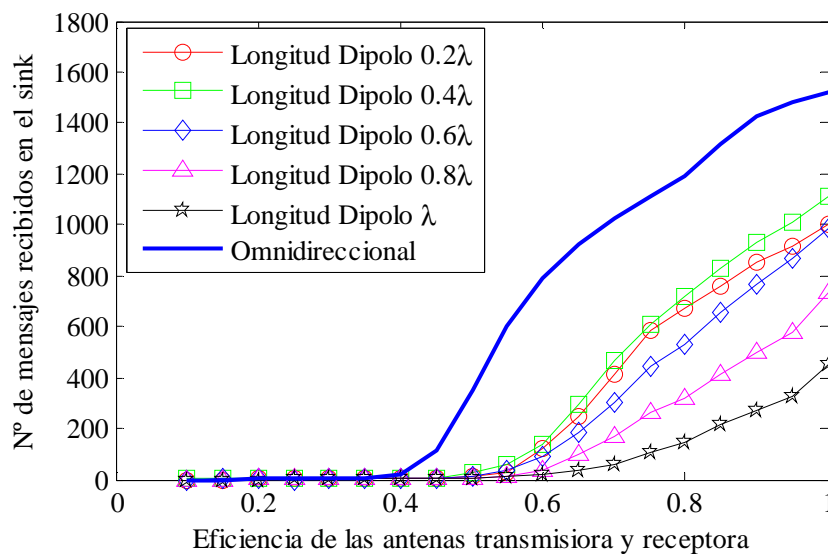


Figura 67.- Número de mensajes recibidos en el nodo destino cuando varía la eficiencia de las antenas para distintas longitudes de dipolo (modelo 3D) en una red de 115 nodos. También se incluyen resultados para la red con antenas ideales. El radio de cobertura de los sensores es 250 m.

Hay que destacar que en la Figura 67, los resultados para una longitud de dipolo de 0.4λ son mejores que los que se obtienen para una longitud de 0.2λ . Para explicar este comportamiento, es necesario observar la Figura 14. Los diagramas de radiación para longitudes de dipolo 0.2λ y 0.4λ no presentan gran diferencia. A medida que la longitud del dipolo se hace más grande,

las diferencias en el diagrama de radiación se hacen más notables, aumentando rápidamente la directividad de la antena. Por eso, al utilizar diagramas de radiación muy similares, la aleatoriedad hace que se generen redes más eficientes con un dipolo de longitud 0.4λ que con un dipolo de longitud 0.2λ .

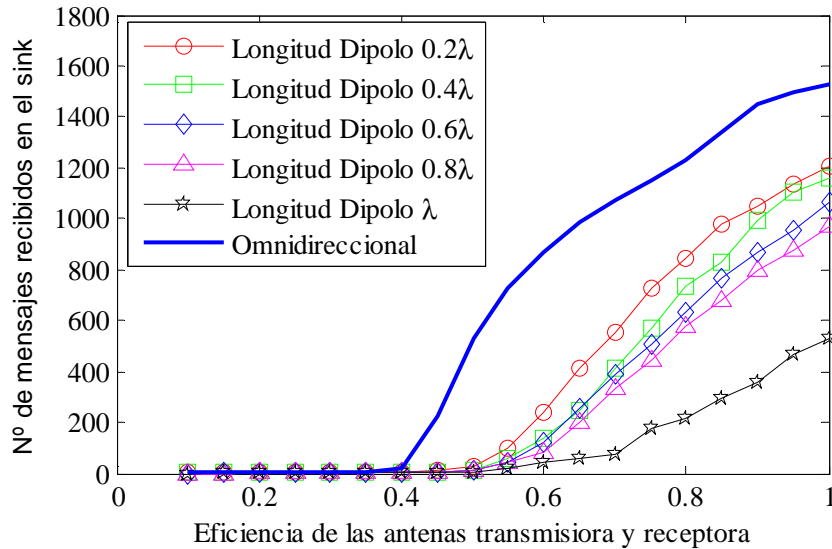


Figura 68.- Número de mensajes recibidos en el nodo destino cuando varía la eficiencia de las antenas para distintas longitudes de dipolo (modelo 3D) en una red de 130 nodos. También se incluyen resultados para la red con antenas ideales. El radio de cobertura de los sensores es 250 m.

Finalmente se analizan las prestaciones cuando varía el número de nodos que componen la red. La Figura 69, Figura 70, Figura 71, Figura 72 y Figura 73 ilustran los resultados obtenidos con dipolos de diferente longitud. Se pueden extraer conclusiones análogas a las obtenidas anteriormente.

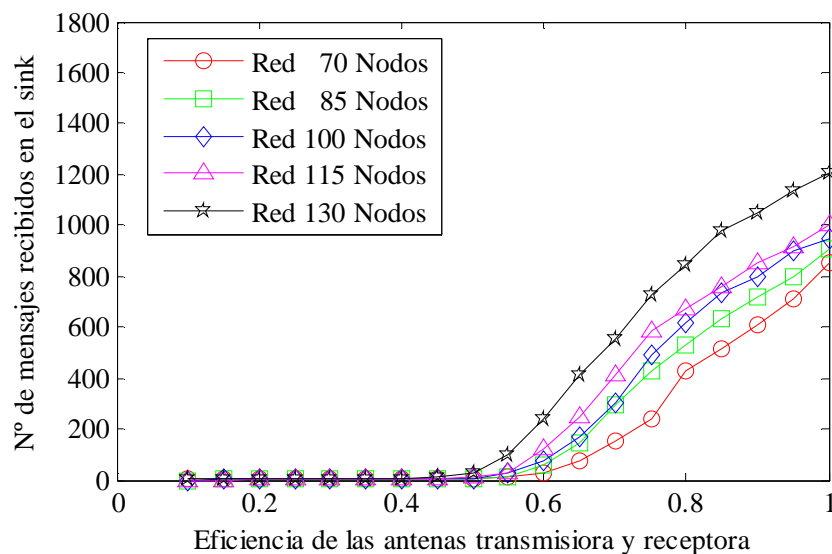


Figura 69. - Número de mensajes recibidos en el nodo destino cuando varía la eficiencia de las antenas y la densidad de red para longitud del dipolo de 0.2λ (modelo 3D). El radio de cobertura de los sensores es 250 m.

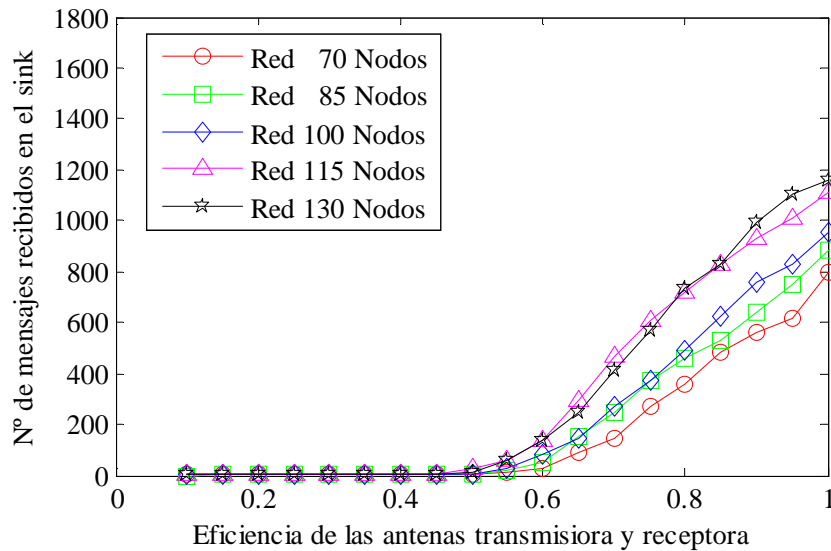


Figura 70.- Número de mensajes recibidos en el nodo destino cuando varía la eficiencia de las antenas y la densidad de red para longitud del dipolo de 0.4λ (modelo 3D). El radio de cobertura de los sensores es 250 m.

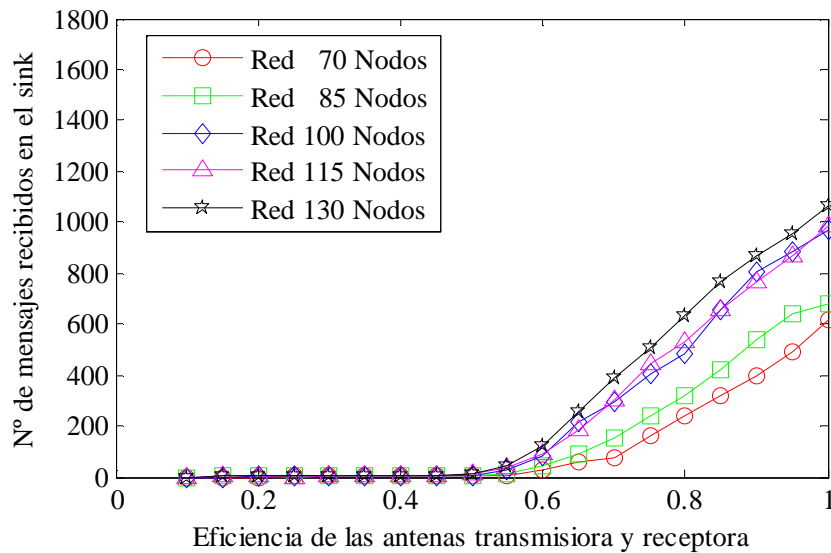


Figura 71.- Número de mensajes recibidos en el nodo destino cuando varía la eficiencia de las antenas y la densidad de red para longitud del dipolo de 0.6λ (modelo 3D). El radio de cobertura de los sensores es 250 m.

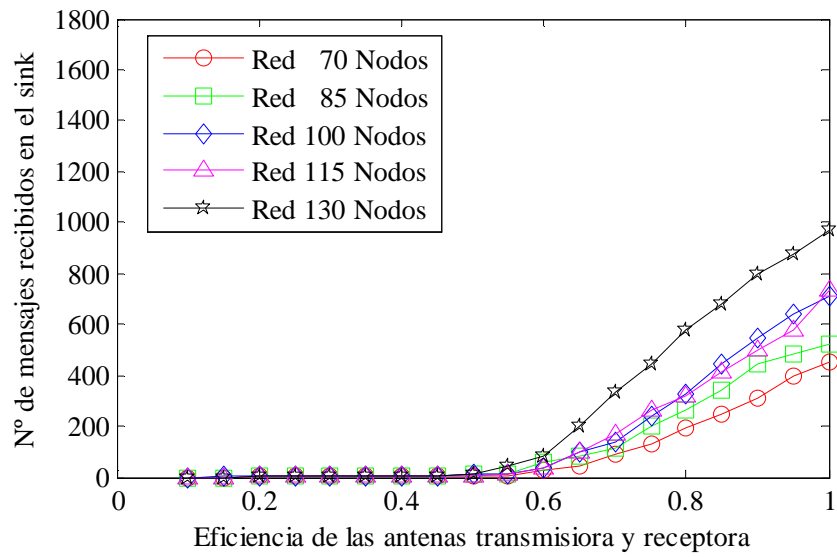


Figura 72.- Número de mensajes recibidos en el nodo destino cuando varía la eficiencia de las antenas y la densidad de red para longitud del dipolo de 0.8λ (modelo 3D). El radio de cobertura de los sensores es 250 m.

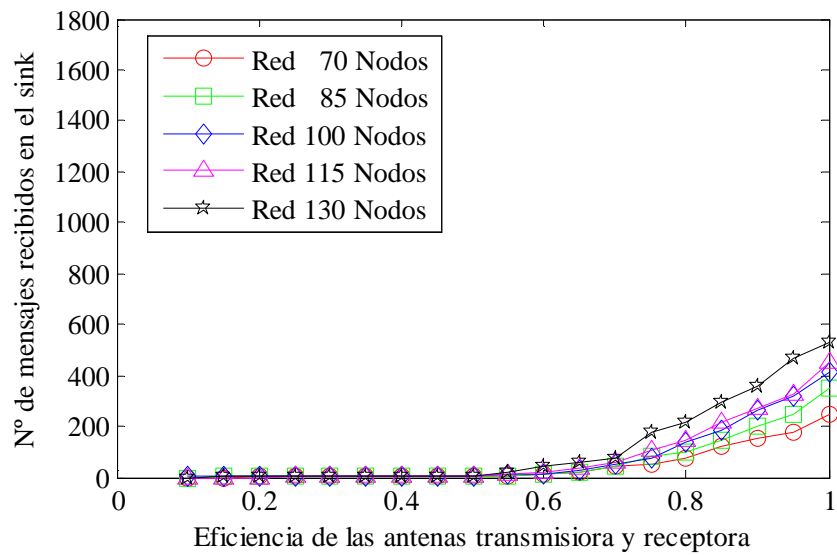


Figura 73.- Número de mensajes recibidos en el nodo destino cuando varía la eficiencia de las antenas y la densidad de red para longitud del dipolo de λ (modelo 3D). El radio de cobertura de los sensores es 250 m.

c. Tercer escenario: antenas reales

En esta sección se presentan los resultados obtenidos en las simulaciones de los escenarios con antenas reales. En este contexto no tiene sentido evaluar las prestaciones para todo el barrido de valores de eficiencia, ya que las antenas tienen un valor de eficiencia que depende del propio diseño de la antena y son dadas por el fabricante en las especificaciones. Por tanto, sólo se incluye el diagrama de radiación de la antena considerando un valor de eficiencia del 100% en todos los casos. Al igual que en los escenarios anteriores, se evalúan las prestaciones de la red para topologías con densidades que corresponden a los valores de la Tabla 1 y para un radio de cobertura de los sensores de 250 metros.

Los resultados obtenidos para las dos antenas reales propuesta en el *Capítulo 3* corroboran lo analizado en los escenarios anteriores. Cuando la red de sensores es más densa se reciben más mensajes en el nodo destino (véase Figura 74).

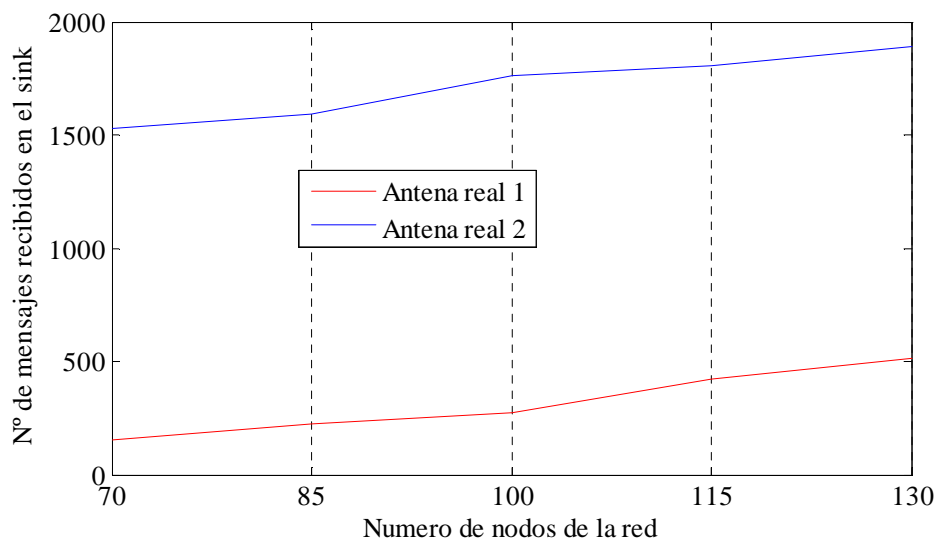


Figura 74.- Número de mensajes recibidos en el nodo destino según el número de nodos de la red, para redes con antenas reales.

Comparando los resultados obtenidos de cada una de las antenas se observa que la *antena real 2* dota de mejor funcionalidad a la red que la *antena real 1*. Si bien en ambos casos aumentar el número de nodos proporciona mejores prestaciones a la red, en el escenario con *antena real 2* este aumento en la densidad de los nodos mejora ligeramente el número de mensajes recibidos. Sin embargo, en el escenario con *antena real 1* aumentar el número de nodos de 100 a 130 supone duplicar el número de mensajes recibidos en destino.

Por otro lado, la influencia del diagrama de radiación en las prestaciones de la red de sensores es clara, haciéndose notable la diferencia en el número de mensajes recibidos con éxito en el nodo destino entre ambos tipos de antenas. En cualquier caso, la *antena real 2* es preferible a la *antena real 1*.

Estas conclusiones son extrapolables a nodos que tienen un radio de cobertura diferente.

Capítulo 5

Conclusiones y líneas futuras

5.1. Conclusiones

En este Proyecto Fin de Carrera se ha estudiado la influencia de incluir en la capa física información relevante de características de los sensores (antenas para aplicaciones de microondas) sobre las prestaciones de la red. Parámetros como los diagramas de radiación y la eficiencia de las antenas se han introducido mediante el uso del modelo de distancias equivalentes descrito en [5].

Inicialmente, en el análisis se han considerado antenas ideales, isotrópicas, lo que permitió evaluar las prestaciones de la red en función de la eficiencia de las antenas para diferentes radios de cobertura de los sensores y distintas densidades de red. Conocidas las implicaciones de contar con antenas más o menos eficientes, se introdujo en el estudio posibles derivas en el diagrama de radiación (perdidas de isotropía). Para ello se eligió una antena tipo dipolo de longitud l . Para que los resultados estuvieran dotados de mayor realismo se ha modelado el sensor tanto en dos como en tres dimensiones.

Por último, se han utilizado diagramas de radiación medidos en antenas reales diseñadas para aplicaciones específicas de este tipo de redes. Los resultados obtenidos en estas simulaciones han corroborado los obtenidos en los planteamientos teóricos, entendiéndose como planteamiento teórico el hecho de utilizar una expresión matemática para definir el diagrama de radiación.

Los resultados que se han obtenido certifican la necesidad de hacer un estudio previo al despliegue de la red en el que se incluyan parámetros característicos de las antenas de los nodos para poder prestar las funcionalidades requeridas por la aplicación. Este conocimiento permite dimensionar la red de manera más eficiente, eligiendo el número de sensores, el tipo de antenas o la cobertura de los sensores de la forma más adecuada a cada situación. Como sucede en otros muchos ámbitos, no existe una solución única válida para el despliegue de una red de sensores, sino que siempre hay que buscar un compromiso. El estudio realizado ha demostrado que parámetros como la

eficiencia de las antenas o el diagrama de radiación de las mismas influyen de manera notable en las prestaciones de la red de sensores. Los resultados obtenidos en las simulaciones mostraron la viabilidad de alternativas que proporcionan funcionalidades similares.

Así, contar con antenas que transmiten a distancias grandes, aumentando el radio de cobertura del nodo (aumenta el número de vecinos de cada nodo), implica un mayor gasto de energía en el nodo transmisor, consumiendo más rápido las baterías de los dispositivos y reduciendo por tanto el tiempo de vida de la red. Una solución para alargar el tiempo de funcionamiento de la red de sensores es utilizar antenas menos potentes, más baratas pero aumentar el número de ellas en el despliegue de la red (incrementar el número de nodos) de forma que se presten las mismas funcionalidades que en el caso anterior. De esta forma se rebaja el consumo de energía en las transmisiones, lo que aumenta el tiempo de vida de la red. Por otro lado, dado el despliegue de un determinado número de nodos en la red, una alternativa a utilizar antenas de elevada eficiencia (pero mayor longitud) es usar, por ejemplo, dipolos de menor longitud (antenas más parecidas a las ideales) para alcanzar el mismo nivel de prestaciones en la red. Dado un tipo de antena (e.g. dipolo de una determinada longitud), para alcanzar el mismo nivel de prestaciones se puede o bien aumentar la eficiencia (y reducir el número de nodos de la red) o bien aumentar su número y reducir su eficiencia.

Por otro lado, un parámetro crítico es la eficiencia de las antenas. Así, se ha podido establecer un umbral por debajo del cual las funcionalidades de la red de sensores se degeneraban llegando a ser nulas. Por tanto, es necesario conocer la eficiencia de la antena que se dispone. Los resultados que se han obtenido dejan claro que utilizar antenas con alta eficiencia garantiza funcionalidades óptimas del sistema. Si no es posible contar con este tipo de antenas, el estudio ha reflejado que se pueden alcanzar compromisos entre la eficiencia de la antena y el número de sensores que se despliegan o el radio de cobertura de estos, tal y como se ha comentado. Los resultados de las simulaciones han reflejado que cuanto más densa es la red, es decir, el umbral en la eficiencia se hace más bajo, se pueden utilizar antenas con eficiencias más bajas para conseguir las prestaciones requeridas. El mismo efecto produce el aumentar el radio de cobertura de los sensores.

Por último, se ha introducido en el estudio el diagrama de radiación de la antena que se utiliza. Los resultados han constatado que las prestaciones del sistema se degeneran a medida que las antenas son más directivas. También se puede llegar a compromisos entre la antena utilizada (distintos diagramas de radiación) y el número de éstas en la red de sensores. Antenas omnidireccionales (poco directivas) garantizan mejores resultados, por lo que se puede disminuir el número de nodos y mantener las funcionalidades requeridas por el sistema.

En resumen, caracterizar el dispositivo radiante que se va a utilizar en el despliegue de una red de sensores es fundamental para poder diseñar el sistema de forma óptima y garantizar su funcionalidad.

5.2. Líneas futuras de investigación

A partir del trabajo realizado en este Proyecto Fin de Carrera surgen diversos puntos de interés que pueden ser el origen de futuras investigaciones. Entre ellas, podrían destacarse las siguientes:

- Estudio de las prestaciones de las redes de sensores cuando las antenas son reconfigurables. Sería interesante realizar un análisis donde las antenas de los nodos transmisores se configuran según las características de la red en ese momento (nivel de pérdidas del canal, nodos activos en ese momento) y el estado propio del nodo (nivel de las baterías, número de vecinos a los que transmitir, etc.).
- Utilizar diagramas de radiación que correspondan a otro tipo de antenas. Estos pueden ser generados a partir de su expresión matemática, o bien medidos en antenas reales (en este último caso si se trata de aplicaciones concretas).
- Evaluar los efectos de considerar otros parámetros característicos de las antenas, por ejemplo, utilizando diagramas de radiación que tengan en cuenta la polarización de las antenas.
- Estudio de las prestaciones en modelos de redes más reales que introduzcan pérdidas en la transmisión de los mensajes al nodo destino.
- Complementar el estudio realizado con algoritmos de enrutamiento diferentes propuestos en la literatura.

Apéndice

Planificación y presupuesto

En este apéndice se presenta una relación de las tareas en las que se ha dividido la realización de este Proyecto Fin de Carrera y un desglose justificado de los costes para llevarse a cabo.

Adicionalmente, también se presenta un presupuesto total de ejecución del proyecto, incluyendo el coste de cada tarea así como de los materiales empleados.

1. Descomposición en tareas

A continuación, se describen las tareas realizadas para la ejecución de este proyecto, detallando la finalidad de las mismas, la relación con otras tareas, la duración y el esfuerzo dedicado a cada una de ellas.

▪ TAREA A: DOCUMENTACIÓN

- Subtarea A.1: Revisión del Estado del Arte de las redes de sensores
 - *Descripción:* en esta primera tarea se realiza un análisis de la tecnología de las redes de sensores, así como de sus principales características, limitaciones y aplicaciones.
 - *Objetivos:* obtener una visión general de las redes de sensores.
 - *Dependencia con otras tareas:* esta tarea dará comienzo al inicio del proyecto.
 - *Duración:* 3 semanas.
 - *Recursos:* Ingeniero Técnico 0.5 hombres/mes.
- Subtarea A.2: Revisión del Estado del Arte de las antenas en sensores

- *Descripción:* análisis de las características radiantes de las antenas, centrándose principalmente en las antenas de las redes de sensores.
- *Objetivos:* obtener una visión general de las antenas utilizadas en las redes de sensores.
- *Dependencia con otras tareas:* esta tarea dará comienzo tras finalizar la Tarea A.1.
- *Duración:* 3 semanas.
- *Recursos:* Ingeniero Técnico 0.5 hombres/mes.

■ TAREA B: DESARROLLO DEL *SOFTWARE*

- Subtarea B.1: Reciclado de código
 - *Descripción:* en esta tarea se recopilan los códigos necesarios para la creación y despliegue de los nodos, definición de los parámetros de red, el algoritmo de enrutamiento y la generación de las topologías necesarias para cada uno de los escenarios simulados.
 - *Objetivos:* recopilar y asimilar el código necesario para poder realizar las simulaciones.
 - *Dependencia con otras tareas:* esta tarea dará comienzo tras la Tarea A.2.
 - *Duración:* 2 semanas.
 - *Recursos:* Ingeniero Técnico 0.5 hombres/mes.
- Subtarea B.2: Escenarios
 - *Descripción:* en esta tarea se programa con MATLAB® el *software* para la creación de las tablas de directividades correspondientes a cada uno de los nodos para los diferentes escenarios que se van a simular.
 - *Objetivos:* implementar mediante MATLAB® los escenarios necesarios para la realización de las simulaciones.
 - *Dependencia con otras tareas:* esta tarea dará comienzo tras la Tarea B.1.
 - *Duración:* 4 semanas.
 - *Recursos:* Ingeniero Técnico 1 hombres/mes.

■ TAREA C: OBTENCION DE SIMULACIONES

- Subtarea C.1: Pruebas preliminares
 - *Descripción:* en esta tarea se realiza una batería de pruebas del *software* implementado para comprobar su comportamiento y eliminar errores. Además se decide que simulaciones van a ser incluidas en la memoria.
 - *Objetivos:* comprobar el correcto funcionamiento del *software* implementado y elegir las simulaciones a realizar.

- *Dependencia con otras tareas:* esta tarea dará comienzo tras la Tarea B.2.
- *Duración:* 3 semanas.
- *Recursos:* Ingeniero Técnico 1 hombres/mes.
- Subtarea C.2: Simulaciones definitivas
 - *Descripción:* se obtienen las prestaciones de las redes de sensores para cada una de las simulaciones realizadas en función del número de nodos, la directividad de las antenas, el tipo de antena, etc.
 - *Objetivos:* generar las simulaciones para realizar un análisis de los resultados.
 - *Dependencia con otras tareas:* esta tarea dará comienzo tras la Tarea C.1.
 - *Duración:* 9 semanas.
 - *Recursos:* Ingeniero Técnico 0.25 hombres/mes.

■ TAREA D: REDACCIÓN DE LA MEMORIA

- Subtarea D.1: Organización y estructura de la memoria del documento
 - *Descripción:* se organiza y da la estructura adecuada al documento.
 - *Objetivos:* organización y estructura de la memoria del proyecto Fin de Carrera.
 - *Dependencia con otras tareas:* esta tarea dará comienzo tras la Tarea C.2.
 - *Duración:* 1 semana.
 - *Recursos:* Ingeniero Técnico 0.5 hombres/mes.
- Subtarea D.2: Realización del documento final
 - *Descripción:* se redacta el documento final del proyecto.
 - *Objetivos:* redacción de cada uno de los capítulos y apéndice de este Proyecto Fin de Carrera.
 - *Dependencia con otras tareas:* esta tarea dará comienzo tras la Tarea D.1.
 - *Duración:* 6 semanas.
 - *Recursos:* Ingeniero Técnico 0.75 hombres/mes.

■ TAREA E: PRESENTACIÓN

- *Descripción:* preparación de la presentación de este proyecto.
- *Objetivos:* elaborar un conjunto de diapositivas adecuado que permitan tener una visión clara y completa del trabajo realizado.
- *Dependencia con otras tareas:* esta tarea dará comienzo tras la Tarea D.2.
- *Duración:* 1 semana.
- *Recursos:* Ingeniero Técnico 0.75 hombres/mes.

Tarea	Duración (semanas)	Recursos (Ing. Tec./mes)	Total (horas)
DOCUMENTACIÓN			
A.1. Revisión del Estado del Arte de las redes de sensores	3	0.5	60
A.2. Revisión del Estado del Arte de las antenas en sensores	3	0.5	60
Total			120
DESARROLLO DEL SOFTWARE			
B.1. Reciclado de código	2	0.5	40
B.2. Escenarios	4	1	160
Total			180
OBTENCION DE SIMULACIONES			
C.1. Pruebas preliminares	3	1	120
C.2. Simulaciones definitivas	9	0.25	90
Total			210
REDACCIÓN DE LA MEMORIA			
D.1. Organización y estructura de la memoria del documento	1	0.5	20
D.2. Realización del documento final	6	0.75	180
Total			200
PRESENTACIÓN			
E.1. Presentación	1	0.75	30
Total			30
Total			740

Tabla A. 1.- Resumen de las tareas del proyecto.

2. Recursos

En este apartado se detallan los recursos empleados para realizar este Proyecto Fin de Carrera:

- Recursos materiales:
 1. Ordenador de sobremesa con procesador *Intel Pentium 4* 1.73 GHz y 2 GB RAM. Sistema operativo *Windows XP*.
 2. Programa *MATLAB®* versión R2007b.
- Recursos de trabajo: 1 Ingeniero Técnico en Telecomunicaciones.

3. Presupuesto del proyecto

1. **Autor:** Carlos Madroño Prados.
2. **Departamento:** Teoría de la Señal y Comunicaciones (TSC).
3. **Descripción del proyecto:**
 - *Título:* Estudio de las prestaciones en las redes de sensores a través de la influencia de la directividad y eficiencia de los elementos radiantes.
 - *Duración:* 8 meses.
 - Tasas de costes indirectos: no se especifican.

Presupuesto total del proyecto (valorado en Euros): 12350 €.

Concepto	Cantidad	Coste (€)	Total (€)
Recursos materiales			
Ordenador de sobremesa	1	600	600
Licencia MATLAB	1	500	500
Total			1100
Recursos de trabajo			
1 Ingeniero Técnico de Telecomunicaciones	1 (740 horas)	15 €/hora	11100
Total			11100
Otros			
Documentación	-	.-	-
Reuniones	-	-	-
Total			-
			12200

Tabla A. 2.- Desglose del presupuesto

4. **Subcontratación de tareas:** no se especifican.
5. **Otros costes directos del proyecto:** no se especifican.

Referencias

- [1] Randy Bancroft, *Fundamental Dimension Limits of Antennas*, Centurion Wireless Technologies, Westminster, Colorado.
- [2] Arthur D. Yaghjian y Howard R. Stuart, *Lower Bounds on the Q of Electrically Small Dipole Antennas*, IEEE Transactions on Antennas and Propagation, Vol. 58, NO. 10, Octubre 2010, pp. 3114-3121.
- [3] S. Cheng, P. Hallbjörner, A. Rydberg, D. Vanotterdijk y P. van Engen, *T-matched dipole antenna integrated in electrically small body-worm wireless sensor node*, IET Microw. Antennas Propag., 2009, Vol.3, Iss. 5, pp. 774-781.
- [4] Huiqing Zhai, Saibun Tjuatja, Jonathan W. Bredow y Mingyu Lu, *A Quasi-Planar Conical Antenna With Broad Bandwidth and Omnidirectional Pattern for Ultrawideband Radar Sensor Network Applications*, IEEE Transactions on Antennas and Propagation, Vol. 58, NO. 11, Noviembre 2010, pp. 3480-3489.
- [5] R. Arroyo Valles, O. Quevedo Teruel, J. Cid Sueiro, E. Rajo Iglesias, *Estudio de la Influencia del Diagrama de Radiación y la Eficiencia de los Dispositivos Radiantes en las Prestaciones de Redes de Sensores*, XXIV Symposium Nacional de la Unión Científica Internacional de Radio (URSI 2009), Santander, Sep. 2009.
- [6] C. Buratti, A. Conti, D. Dardari y R. Verdonesi, *An Overview on Wireless Sensor Networks Technology and Evolution*, Bologna, Italia, Agosto 2009.
- [7] I. Akyildiz, W. Su, Y. Sankarasubramanian y E. Cavarero, *A survey on sensor networks*, IEEE Comm. Magazine, vol.40, no.8, pp.102-114, 2002.
- [8] Página web de Crossbow technologies. <http://www.xbow.com/>. Última visita en abril 2011.
- [9] Kay Römer and Friedemann Mattern, *The Design Space of Wireless Sensor Networks*, IEEE Wireless Communications, pp. 54-61, Diciembre 2004.
- [10] H. Abelson et al., *Amorphous Computing*, CACM, vol. 43, no. 5, Mar. 2000, pp 74-82.

- [11] J.M.Kahn, R.H.Katz, and K.S.J.Pister, *Emerging challenges: Mobile Networking for Smart Dust*, J. Communications and Networks, vol. 2, no 3, Sept. 2000, pp. 188-96.
- [12] T. Nadeem y A. Agrawala, *IEEE 802.11 fragmentation-Aware Energy-Efficient Ad-Hoc Routing Protocols*, IEEE Int. Conf. on Mobile-Ad-Hoc and sensor Systems, 2004.
- [13] CY. Chong, SP. Kumar. *Sensor Networks: Evolution, Opportunities, and Challenges*. Proceedings of the IEEE. Vol. 91, NO. 8, pp. 1247-1256. Agosto 2003.
- [14] C. A. Balanis, *Antenna Theory: Analysis and Design*, 3rd ed. New York: Wiley-Interscience, 2005.
- [15] J. C. Maxwell, *A Treatise on Electricity and Magnetism*, Oxford University Press, London, UK, 1873, 1904.
- [16] R. C. Hansen, *Fundamental limitations in antennas*, Proc. IEEE, Vol. 69, pp. 170-182, Febrero 1981.
- [17] Richard W. Ziolkowski and Ayca Erentok, *Metamaterial-Based Efficient Electrically Small Antennas*, IEEE Transactions on Antennas and Propagation, Vol. 54, NO. 7, Julio 2006.
- [18] Página web de Dockon wireless redefined. http://www.dockon.com/wp-content/content/Dockon_Microstrip_Compound_Antennas.pdf Última visita en abril 2011.
- [19] James S. McLean, *A Re-Examination of the Fundamental Limits on the Radiation Q of Electrically Small Antennas*, IEEE Transactions on Antennas and Propagation, Vol. 44, NO. 5, Mayo 1996.
- [20] H. A. Wheeler, *Fundamental limitations of antennas*, Proc. IRE, Vol. 35, pp. 1479-1484, Diciembre 1947.
- [21] G. Anastasi, M. Conti, M. Di-Francesco, and A. Passarella. *Energy conservation in wireless sensor networks: A survey*. Ad Hoc Networks, vol. 7, num. 3, pp. 537 – 568, 2009.
- [22] G. Pottie and W. Kaiser. *Wireless integrated network sensors*. Communications of the ACM, vol. 43, no. 5, pp. 51-58, 2000.
- [23] B. Karp and H. Kung. *Greedy Perimeter Stateless Routing for Wireless Networks*. In Proc. 6th Annual ACM/IEEE Int'l Conf. on Mobile Computing and Networking (MobiCom 2000), pp. 243-254, 2000.
- [24] Página web donde se detallan las especificaciones de la antena Mica 2.4 GHz SMD. www.antenova.com/?id=742 . Última visita en abril 2011.